

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Semiconductor devices – Flexible and stretchable semiconductor devices –
Part 6: Test method for sheet resistance of flexible conducting films**

**Dispositifs à semiconducteurs – Dispositifs à semiconducteurs souples
et extensibles –
Partie 6: Méthode d'essai pour la résistance de couche des couches
conductrices souples**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2019 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
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

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

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

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

Electropedia - 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

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

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

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Service Clients - 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.

Electropedia - 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

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Semiconductor devices – Flexible and stretchable semiconductor devices –
Part 6: Test method for sheet resistance of flexible conducting films**

**Dispositifs à semiconducteurs – Dispositifs à semiconducteurs souples
et extensibles –
Partie 6: Méthode d'essai pour la résistance de couche des couches
conductrices souples**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 31.080.99

ISBN 978-2-8322-6871-1

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

CONTENTS

FOREWORD	4
1 Scope	6
2 Normative references	6
3 Terms and definitions	6
4 Atmospheric conditions for evaluation and conditioning	7
5 In situ measurements using 2-point probe method	8
5.1 General	8
5.2 Sample preparation	8
5.3 Test methods	8
5.3.1 Test apparatus	8
5.3.2 Measurement and data analysis	9
5.4 Report of results	9
6 Uniformity measurement using 4-point probe method	10
6.1 General	10
6.2 Test methods	10
6.2.1 Test apparatus	10
6.2.2 Measurement and data analysis	10
6.3 Report of results	11
7 Anisotropic measurement using the Montgomery method	12
7.1 General	12
7.2 Test methods	12
7.2.1 Test apparatus	12
7.2.2 Measurement and data analysis	12
7.3 Report of results	13
Annex A (informative) Bending tests	14
Annex B (informative) 4-point probe measurements	15
B.1 General	15
B.2 Correction for finite sample size	15
B.3 Correction factors accounting for finite size probe tips	20
Annex C (informative) Montgomery method	22
C.1 General	22
C.2 Sample preparation	22
C.3 Measurement of sheet resistance of isotropic sample	23
C.4 Measurement of anisotropic sheet resistance	24
Bibliography	25
Figure 1 – Possible electric connection of 2-point probe measurement	8
Figure 2 – Gauge section of bending test	9
Figure 3 – Example of measuring positions	11
Figure 4 – Direction of bending and collinear probes	11
Figure 5 – Resistance measurement with the Montgomery method	13
Figure A.1 – Two common bending test methods for flexible substrates	14
Figure B.1 – Schematic diagram of 4-point probe	15
Figure B.2 – Correction factor of square sample depending on length/probe spacing [2]	17

Figure B.3 – Correction factor depending on measuring position when collinear probes are directed vertically.....	18
Figure B.4 – Correction factor depending on measuring position when collinear probes are directed horizontally.....	18
Figure B.5 – Correction factor, f depending on measuring positions and direction of collinear probes	19
Figure B.6 – Example of probe with a finite contact diameter (e.g. 2mm) comparable to inter-distance between probes (e.g. 5 mm)	20
Figure B.7 – Dimensional sketch of probe with a finite contact diameter	21
Figure C.1 – Possible contact placements of square or rectangular sample	22
Figure C.2 – Correction factors for finite contact size on resistivity measurement [4]	23
Figure C.3 – Resistance measurement of Montgomery method	24

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62951-6:2019

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SEMICONDUCTOR DEVICES – FLEXIBLE AND STRETCHABLE SEMICONDUCTOR DEVICES –

Part 6: Test method for sheet resistance of flexible conducting films

FOREWORD

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

International Standard IEC 62951-6 has been prepared by IEC technical committee 47: Semiconductor devices.

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

FDIS	Report on voting
47/2547/FDIS	47/2566/RVD

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

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

A list of all parts in the IEC 62951 series, published under the general title *Semiconductor devices – Flexible and stretchable semiconductor devices*, can be found on the IEC website.

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

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

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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62951-6:2019

SEMICONDUCTOR DEVICES – FLEXIBLE AND STRETCHABLE SEMICONDUCTOR DEVICES –

Part 6: Test method for sheet resistance of flexible conducting films

1 Scope

This part of IEC 62951 specifies terms, as well as the test method and report of sheet resistance of the flexible conducting film under bending and folding tests. The measurement methods include the 2-point probe, 4-point probe and Montgomery method, which can be applied to in-situ and ex-situ measurement and the measurements of anisotropic sheet resistance.

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.

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

3 Terms and definitions

For the purpose 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>

3.1

resistivity

inverse of the conductivity when this inverse exists

[SOURCE: IEC 60050-121:1998, 121-12-04]

3.2

R_s

sheet resistance

resistance of thin films that are nominally uniform in thickness, which is the resistivity divided by the thickness of conducting film

3.3

resistance

for a resistive two-terminal element or two-terminal circuit with terminals A and B, quotient of the voltage (IEC 60050-131:2008, 131-11-56) u_{AB} between the terminals by the electric current i in the element or circuit

$$R = \frac{u_{AB}}{i}$$

where the electric current is taken positive if its direction is from A to B and negative if its direction is from B to A

Note 1 to entry: A resistance cannot be negative.

Note 2 to entry: The term "resistance" is also a short term for "resistance to alternating current" (IEC 60050-131:2013, 131-12-45).

Note 3 to entry: In French, the term "résistance" also denotes a device, in English "resistor" (see IEC 60050-151:2001, 151-13-19).

Note 4 to entry: The coherent SI unit of resistance is ohm, Ω .

[SOURCE: IEC 60050-131:2013, 131-12-04]

3.4

contact resistance

resistance between the surface of a material and the electric contact made to the surface

3.5

radius

distance from the centre of a circle to the circumference

Note 1 to entry: The radius of a sphere is the radius of a great circle.

[SOURCE: IEC 60050-113:2011, 113-01-25]

3.6

radius of curvature

at a point of a curve, radius of the osculating circle

Note 1 to entry: The osculating circle is the circle tangent to a curve at a point that approaches at best the curve in the vicinity of the point.

[SOURCE: IEC 60050-113:2011, 113-01-30]

3.7

2-point probe method

method for measuring the resistivity of a material, using two electric contacts to the material

Note 1 to entry: The measured value is dependent on the probe resistance.

3.8

4-point probe method

method for measuring the resistivity of a material, using four electric contacts to the material

Note 1 to entry: This avoids many contact resistance problems.

3.9

Montgomery method

technique used to measure the resistivity of two-dimensional sample by placing the electrodes on its perimeter

4 Atmospheric conditions for evaluation and conditioning

The standard atmosphere for evaluation (test and measurement) and storage of the specimen shall be a temperature of $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ and relative humidity of $(50 \pm 10) \%$, conforming to standard atmosphere class 2 specified in ISO 291:2008. If a polymer substrate is used for a test piece coated with a conductive layer, the standard atmosphere for evaluation shall be a temperature of $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ and relative humidity of $(50 \pm 5) \%$, conforming to standard atmosphere class 1 specified in ISO 291:2008.

If conditioning is necessary, the same standard atmosphere as specified above shall apply.

5 In situ measurements using 2-point probe method

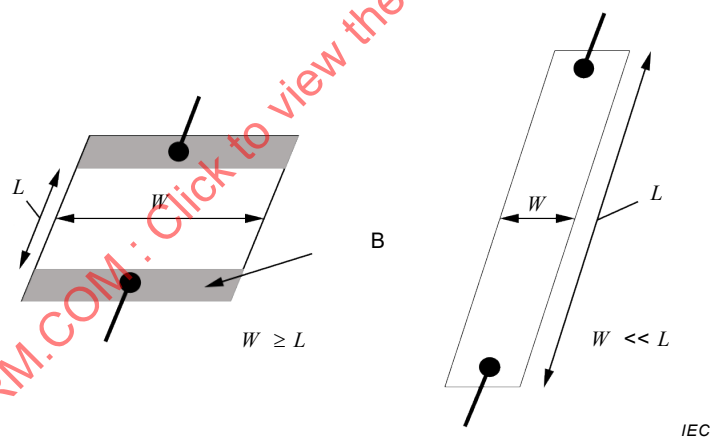
5.1 General

The 2-point probe method for measuring the sheet resistance of a conductive film uses two electric contacts. It is well known that the measured value includes the error caused by the probe resistance and the contact resistance. However, other methods (i.e. 4-point probe and Montgomery method) are not convenient or impossible to use for in-situ measurement during the bending or folding test. Consequently, the 2-point probe method is often necessary for in-situ measurements.

5.2 Sample preparation

To minimize the error caused by the probe resistance and the contact resistance, the following should be satisfied.

- The sample resistance should be 20 times larger than the probe resistance to guarantee the error within 5 % (e.g. if the sheet resistance is about 50 ohms/square and the probe resistance is about 5 Ω , the ratio of length to width, L/W can be larger than 2).
- The probe electric contact should be made securely using highly conductive adhesive, such as silver paste.
- When the width W is comparable or larger than the length L , of the sample, the conducting bar (using highly conductive adhesive, such as silver paste) should be securely attached to the sample to minimize the spreading resistance in the width direction. (see Figure 1)



Key

W width of the sample

L length of the sample

B conductive bar

Figure 1 – Possible electric connection of 2-point probe measurement

5.3 Test methods

5.3.1 Test apparatus

The appropriate evaluation for flexible electronics is bending the sample to a given radius. For this, either the collapsing radius test (see IEC 62951-1) or the $X-Y-\theta$ test can be used (refer to Annex A). It is noted that the gauge section (where the bending radius r is observed) should be measured in the collapsing radius test.

It is noted that the folding test is also similar to the bending test. The difference is the fact that the permanent deformation occurs in folding due to the relatively small radius of curvature.

5.3.2 Measurement and data analysis

Acquisition of temporal resistance data requires digital multimeter, whose reading rate should be 10 times faster than the bending frequency to measure the resistance change during one cyclic bending. It is noted that the applied current can cause heating of the material, which can change its resistivity. To avoid this problem, make sure the measured resistance is constant with time (the average resistance should not drift more than 10 % in a few minutes).

For the 2-point probe method, the sheet resistance, R_s can be calculated from the measured resistance, R , as shown by Formula (1):

$$R_s = R \frac{W}{L} \quad (1)$$

In addition, the bending radius should be measured by fitting circles to optical images of curvature (especially when collapsing radius test is used). When the whole area of sample does not experience the same bending radius (Figure 2), the sheet resistance at the gauge section can be obtained from the initial resistance, R_i as shown by Formula (2):

$$R_s = \left(R - R_i \frac{L - L_{\text{bend}}}{L} \right) \frac{W}{L_{\text{bend}}} \quad (2)$$

After the bending test, it is recommended to measure the sheet resistance of the sample using a 4-point probe. The comparison of measurements between the 2-point and 4-point probe can ascertain the secure electrical connection of the 2-point probe after the bending test and can further reduce the measurement error by the 2-point probe. For the same reason, it is also recommended to measure the sheet resistance using a 4-point probe before the bending test.

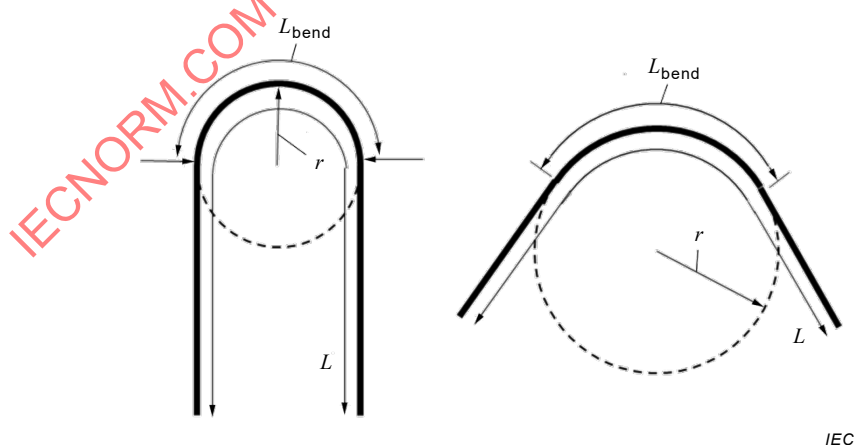


Figure 2 – Gauge section of bending test

5.4 Report of results

The report shall include the following items:

- specimen identification;
- date of test;

- c) atmospheric conditions of test;
- d) bending radius;
- e) sample dimension and the actual bending area (gauge section);
- f) frequency of bending;
- g) temporal sheet resistance curve (or equivalent sheet resistance over bending area);
- h) optical observation permanent deformation;
- i) (optional) 4-point probe measurement before and after the bending test.

6 Uniformity measurement using 4-point probe method

6.1 General

The 4-point probe method is an electrical measuring technique that uses separate pairs of current-carrying and voltage-sensing electrodes to make more accurate measurements than the simpler 2-point probe sensing. Separation of current and voltage electrodes eliminates the lead and contact resistance from the measurement. 4-point probes can accurately measure a resistance below 100 Ω , and therefore it is a suitable technique to evaluate the sheet resistance uniformity of thin films.

6.2 Test methods

6.2.1 Test apparatus

The sheet resistances are measured by pressing collinear 4-point probes against the surface of the film. A current is applied between the outer two points, while the voltage is measured across the inner two points.

For the soft conducting film on flexible substrate, the use of the special collinear probe with a finite contact area equipped with internal springs is recommended. An example of this probe pin is shown in Figure B.6.

6.2.2 Measurement and data analysis

From the induced current, I and the measured voltage, V , the sheet resistance is calculated as:

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} f = 4,5324 \frac{V}{I} f \quad (3)$$

Here, f is the correction factor considering the finite size of the sample and the finite size of the probe contact area and is detailed in Annex B. See Figure B.1 and Figure B.7.

To evaluate the uniformity of the sheet resistance of the conductive film, many measurement points are required. There is not a preferred map for measuring positions, but it is recommended that the positions are located 10 % inside from the edge. An example of measuring positions is shown in Figure 3.

In the case of a long roll of flexible conductive film, it is recommended to acquire the samples from both ends, but not the extremities of the roll and to evaluate the uniformity.

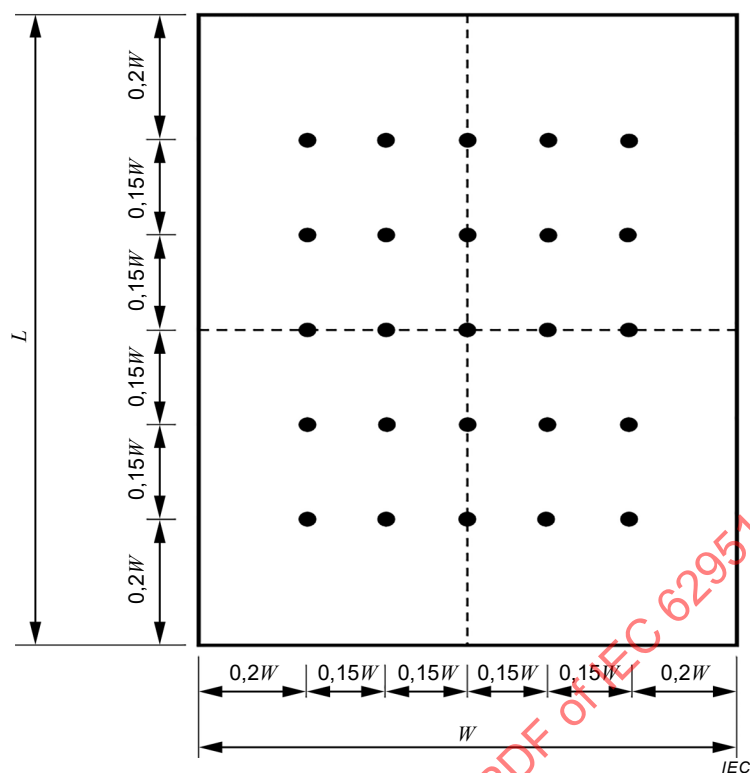
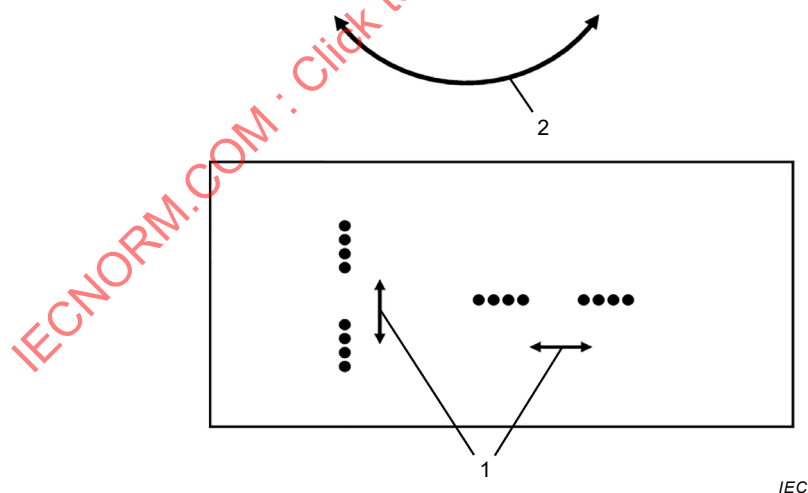


Figure 3 – Example of measuring positions

In the case of a sample after the bending test, anisotropic resistivity may appear. Therefore, it is recommended that the sheet resistance is measured with the collinear probe placed in both directions, parallel and perpendicular to the bending direction, as depicted in Figure 4.



Key

- 1 direction of collinear probes
- 2 bending direction

Figure 4 – Direction of bending and collinear probes

6.3 Report of results

The report shall include the following items:

- a) specimen identification;

- b) date of test;
- c) atmospheric conditions of test;
- d) sample history;
- e) sample dimension and measuring positions;
- f) direction of collinear probes;
- g) sheet resistance data and its statistical uniformity information;
- h) (optional) data of correction factor.

7 Anisotropic measurement using the Montgomery method

7.1 General

The Montgomery method is a technique used to measure the sheet resistance of a sample. Its advantage lies in its ability to accurately measure the sheet resistance of a sample and to measure an anisotropic resistivity as well. However, for this method, electrodes should be placed on the perimeter of the sample, so that it only provides the average value. See Annex C.

7.2 Test methods

7.2.1 Test apparatus

An electric equipment similar to that used for the 4-point probe method can be used. Since the current source and voltmeter shall be switched to all terminals of the sample, equipment with switching matrix to automate measurements is recommended. The electric contacts should be made on the four corners of the rectangular sample and the size of contact should be 10 times smaller than the sample dimension to guarantee an error within 1 %.

7.2.2 Measurement and data analysis

To make a measurement, a current should flow along one edge of the sample (for instance, I_{12} and I_{23}) and the voltage across the opposite edge (in this case, V_{34} and V_{41} , respectively) is measured (refer to Figure 5). From these values, a resistance (for this example, $R_{12,34}$ and $R_{23,41}$) can be found using Ohm's law:

$$R_{12,34} = \frac{V_{34}}{I_{12}} \quad (4)$$

$$R_{23,41} = \frac{V_{41}}{I_{23}} \quad (5)$$

These measurements are repeated to improve the accuracy of the resistance values and the vertical and horizontal resistance can be obtained as follows:

$$R_{\text{vertical}} = \frac{R_{12,34} + R_{21,43} + R_{34,12} + R_{43,21}}{4} \quad (6)$$

$$R_{\text{horizontal}} = \frac{R_{23,41} + R_{32,14} + R_{41,23} + R_{14,32}}{4} \quad (7)$$

If any of the reversed polarity measurements do not agree, to a sufficient degree of accuracy (usually within 3 %), with the corresponding standard polarity measurement, then there is

probably a source of error somewhere in the setup, which should be investigated before continuing. The same principle applies to the reciprocal measurements.

In the case of an anisotropic sample, both the respective sheet resistances for both vertical and horizontal directions can be calculated as follows:

$$R_{s,vertical} = \frac{\pi}{8} \frac{L_{23}}{L_{12}} R_{horizontal} F \sinh(\pi F) \quad (8)$$

$$R_{s,horizontal} = \frac{\pi}{8} \frac{L_{23}}{L_{12}} R_{horizontal} \frac{\sinh(\pi F)}{F} \quad (9)$$

where

$$F \approx \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\pi} \ln \frac{R_{vertical}}{R_{horizontal}} + \sqrt{\left(\frac{1}{\pi} \ln \frac{R_{vertical}}{R_{horizontal}} \right)^2 + 4} \right] \quad (10)$$

L_{12} and L_{23} are vertical and horizontal lengths of the sample, respectively.

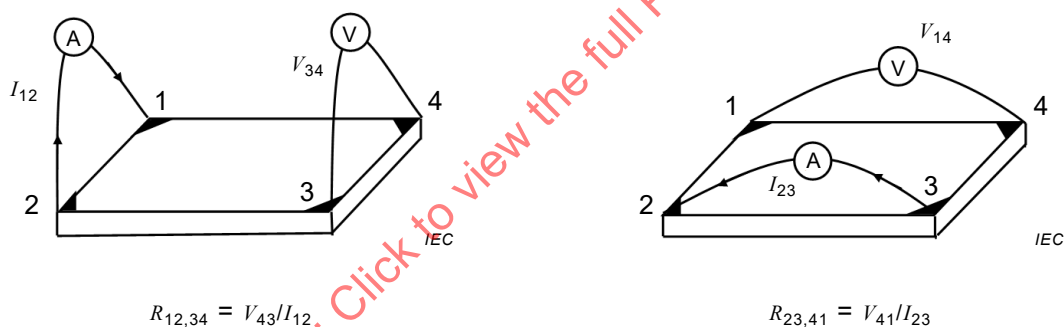


Figure 5 – Resistance measurement with the Montgomery method

7.3 Report of results

The report shall include the following items:

- specimen identification;
- date of test;
- atmospheric conditions of test;
- sample dimension;
- directional sheet resistance data;
- (optional) data of correction factor;
- (optional) sample history (direction of bending).

Annex A (informative)

Bending tests

The appropriate evaluation for flexible electronics is bending the sample to a given radius. For this, the most common technique is the collapsing radius test detailed in IEC 62951-1 (Figure A.1 (left)). In the collapsing radius test, the sample is subjected to a bending radius r (shown in Figure A.1 (left)) in the gauge section only, while other areas are subjected to a bending radius other than r . In the X - Y - θ test (Figure A.1 (right)), also mentioned in IEC 62951-1), the end of the sample is positioned on the coordinates of the circumference, so that the whole area of the sample is subjected to the same bending radius r . Therefore, the X - Y - θ test can provide a larger area for the electrical measurement given the same sample size and it also allows to measure sheet resistance variation depending on the radius of curvature during the bending test.

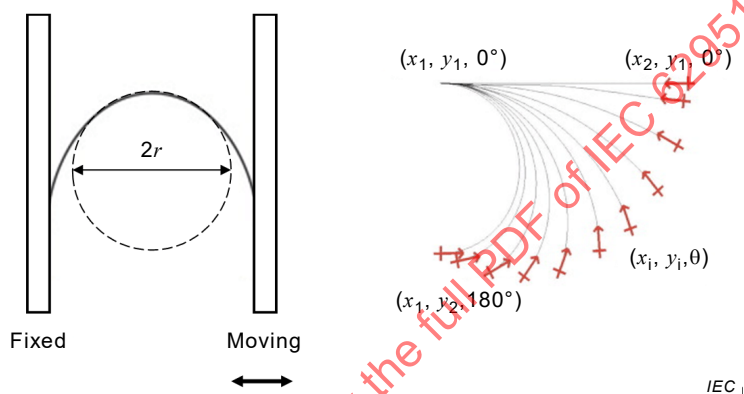


Figure A.1 – Two common bending test methods for flexible substrates

Annex B (informative)

4-point probe measurements

B.1 General

With the probes centered on a very wide (lateral dimension $\gg s$) and very thin (thickness $\ll s$) sample, with s the probe spacing, the sheet resistance is given by:

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} = 4,5324 \frac{V}{I} \quad (\text{B.1})$$

where

I is the current between probe A and D;

V is the potential difference measured between probe B and C.

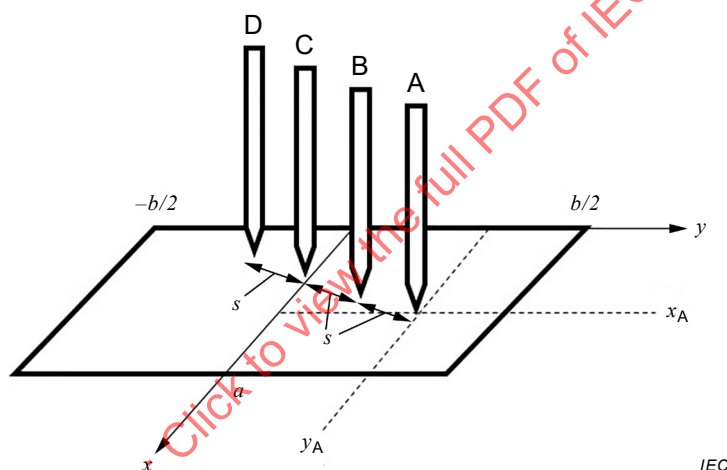


Figure B.1 – Schematic diagram of 4-point probe

B.2 Correction for finite sample size

For a sample of finite width, this should be multiplied by a finite size correction factor f :

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} f = 4,5324 \frac{V}{I} f \quad (\text{B.2})$$

where

f is the finite width correction factor.

The correction factor f can be expressed by the following formula:

$$\begin{aligned}
 F^{-1} = & \frac{y_B - y_C}{a} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{a\zeta \sinh(b\zeta)} \left[\left\{ \cos(\zeta x_B) \cosh \left[\zeta \left(y_B + \frac{b}{2} \right) \right] - \cos(\zeta x_C) \cosh \left[\zeta \left(y_C + \frac{b}{2} \right) \right] \right\} \times \cos(\zeta x_A) \cosh \left[\zeta \left(y_A - \frac{b}{2} \right) \right] \right. \\
 & \left. - \left\{ \cos(\zeta x_B) \cosh \left[\zeta \left(y_B - \frac{b}{2} \right) \right] - \cos(\zeta x_C) \cosh \left[\zeta \left(y_C - \frac{b}{2} \right) \right] \right\} \times \cos(\zeta x_D) \cosh \left[\zeta \left(y_D + \frac{b}{2} \right) \right] \right] \\
 & + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{a\eta \sinh(b\eta)} \times \left[\left\{ \cosh \left[\eta \left(y_B + \frac{b}{2} \right) \right] - \cosh \left[\eta \left(y_C + \frac{b}{2} \right) \right] \right\} \times \cosh \left[\eta \left(y_A - \frac{b}{2} \right) \right] \right. \\
 & \left. - \left\{ \cosh \left[\eta \left(y_B - \frac{b}{2} \right) \right] - \cosh \left[\eta \left(y_C - \frac{b}{2} \right) \right] \right\} \times \cosh \left[\eta \left(y_D + \frac{b}{2} \right) \right] \right] \\
 & + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{a\zeta \sinh(b\zeta)} \times \left[\left\{ \cos(\zeta x_B) \cosh \left[\zeta \left(y_B + \frac{b}{2} \right) \right] - \cos(\zeta x_C) \cosh \left[\zeta \left(y_C + \frac{b}{2} \right) \right] \right\} \times \cos(\zeta x_A) \cosh \left[\zeta \left(y_A - \frac{b}{2} \right) \right] \right. \\
 & \left. - \left\{ \cos(\zeta x_B) \cosh \left[\zeta \left(y_B - \frac{b}{2} \right) \right] - \cos(\zeta x_C) \cosh \left[\zeta \left(y_C - \frac{b}{2} \right) \right] \right\} \times \cos(\zeta x_D) \cosh \left[\zeta \left(y_D + \frac{b}{2} \right) \right] \right]
 \end{aligned} \tag{B.3}$$

where

$$F = \frac{\pi}{\ln 2} f = 4,532 \, 4 f \tag{B.4}$$

(x_A, y_A) are the x, y coordinates of probe A (cm);

(x_B, y_B) are the x, y coordinates of probe B (cm);

(x_C, y_C) are the x, y coordinates of probe C (cm);

(x_D, y_D) are the x, y coordinates of probe D (cm);

a, b are the length of the conductive layer;

$\zeta = m\pi / a$ (m represents an integral number);

$\eta = n\pi / t$ (n represents an integral number, t represents the thickness of the conductive layer);

$$\zeta = (\zeta^2 + \eta^2)^{1/2}.$$

If $t \ll s$ and collinear probes are oriented parallel to the y axis (i.e. $x_A = x_B = x_C = x_D$), Formula (B.3) simplifies to:

$$\begin{aligned}
 F^{-1} = & \frac{s}{a} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2\cos^2(\zeta x_A)}{a\zeta \sinh(b\zeta)} \left[\left\{ \cosh \left[\zeta \left(y_B + \frac{b}{2} \right) \right] - \cosh \left[\zeta \left(y_C + \frac{b}{2} \right) \right] \right\} \times \cosh \left[\zeta \left(y_A - \frac{b}{2} \right) \right] \right. \\
 & \left. - \left\{ \cosh \left[\zeta \left(y_B - \frac{b}{2} \right) \right] - \cosh \left[\zeta \left(y_C - \frac{b}{2} \right) \right] \right\} \times \cosh \left[\zeta \left(y_D + \frac{b}{2} \right) \right] \right] \\
 & + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{a\eta} (e^{-s\eta} - e^{-2s\eta}) + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4\cos^2 \zeta x_A}{a\zeta} (e^{-s\zeta} - e^{-2s\zeta})
 \end{aligned} \tag{B.5}$$

Representative correction factors are shown hereafter. When a 4-point probe is placed at the centre of a square sample, the correction factor, f is calculated using Formula (B.6) resulting in Figure B.2.

Figure B.3 and Figure B.4 show the variation of the correction factor for long samples depending on measuring positions as well as the orientation of collinear probes.

Figure B.5 shows the variation of correction for rectangular samples.

It is noted that the correction factor is closer to 1 when the collinear probes are oriented parallel to the short side. However, in this case, it decreases earlier when the measuring position approaches the edge of samples.

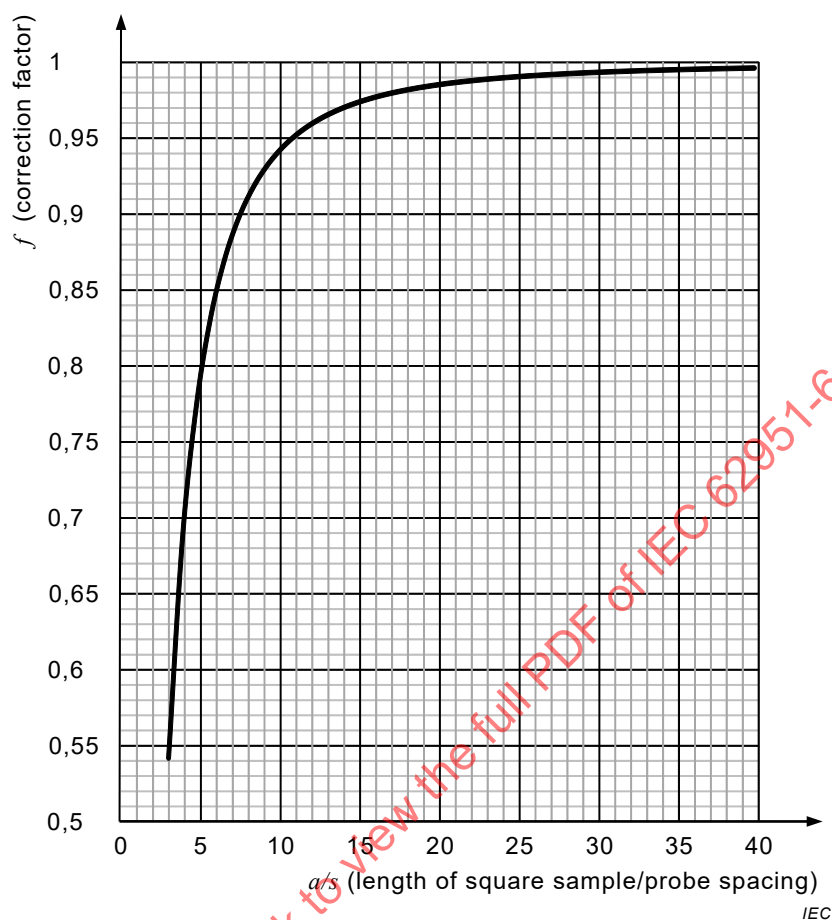


Figure B.2 – Correction factor of square sample depending on length/probe spacing [2]

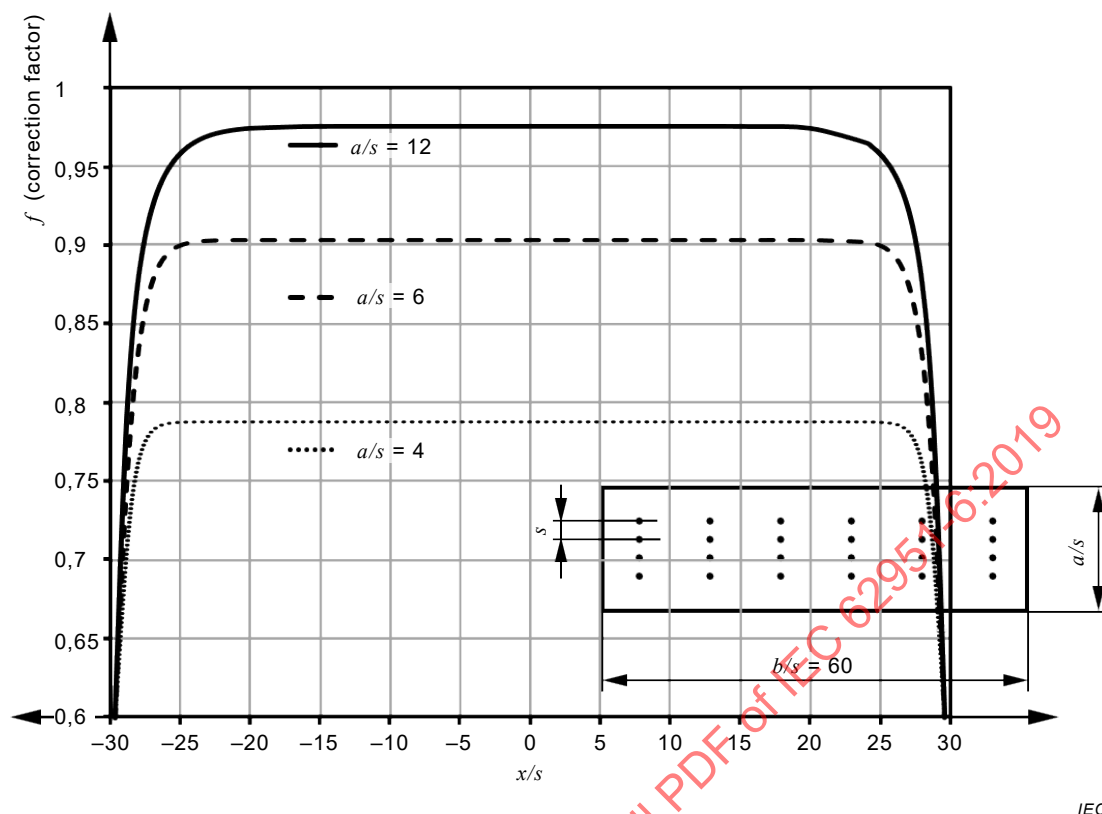


Figure B.3 – Correction factor depending on measuring position when collinear probes are directed vertically

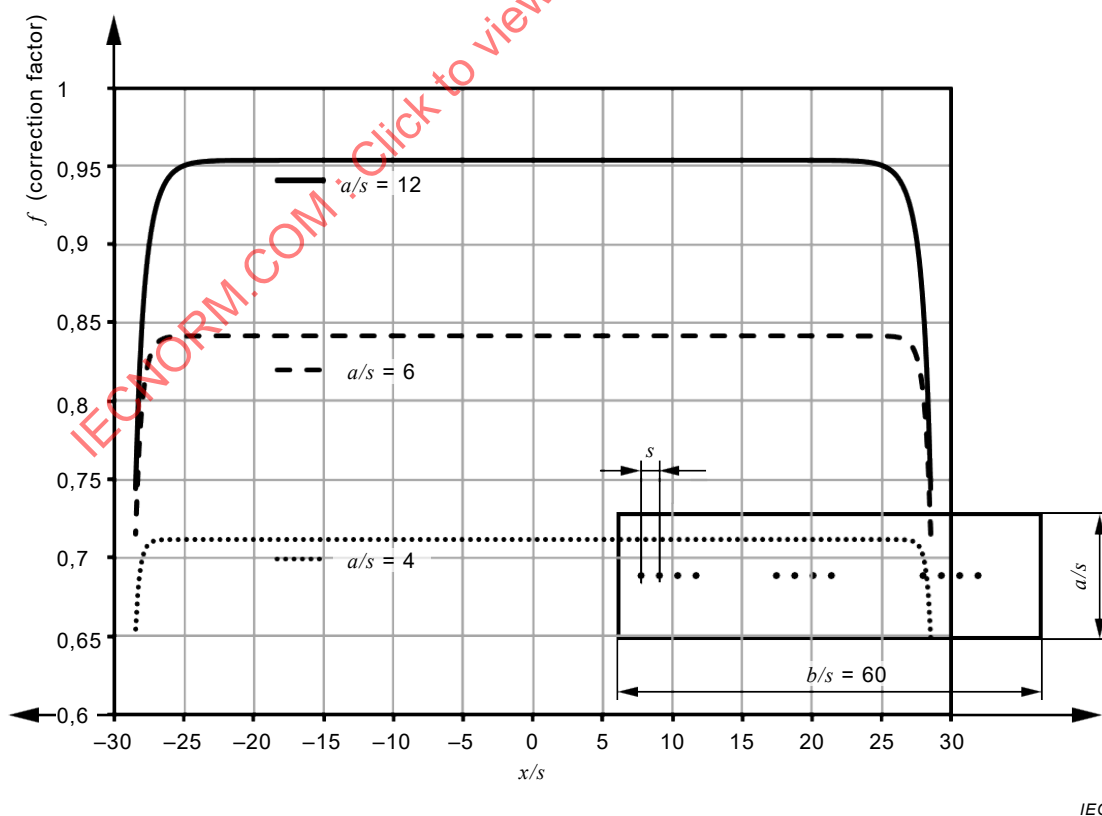


Figure B.4 – Correction factor depending on measuring position when collinear probes are directed horizontally

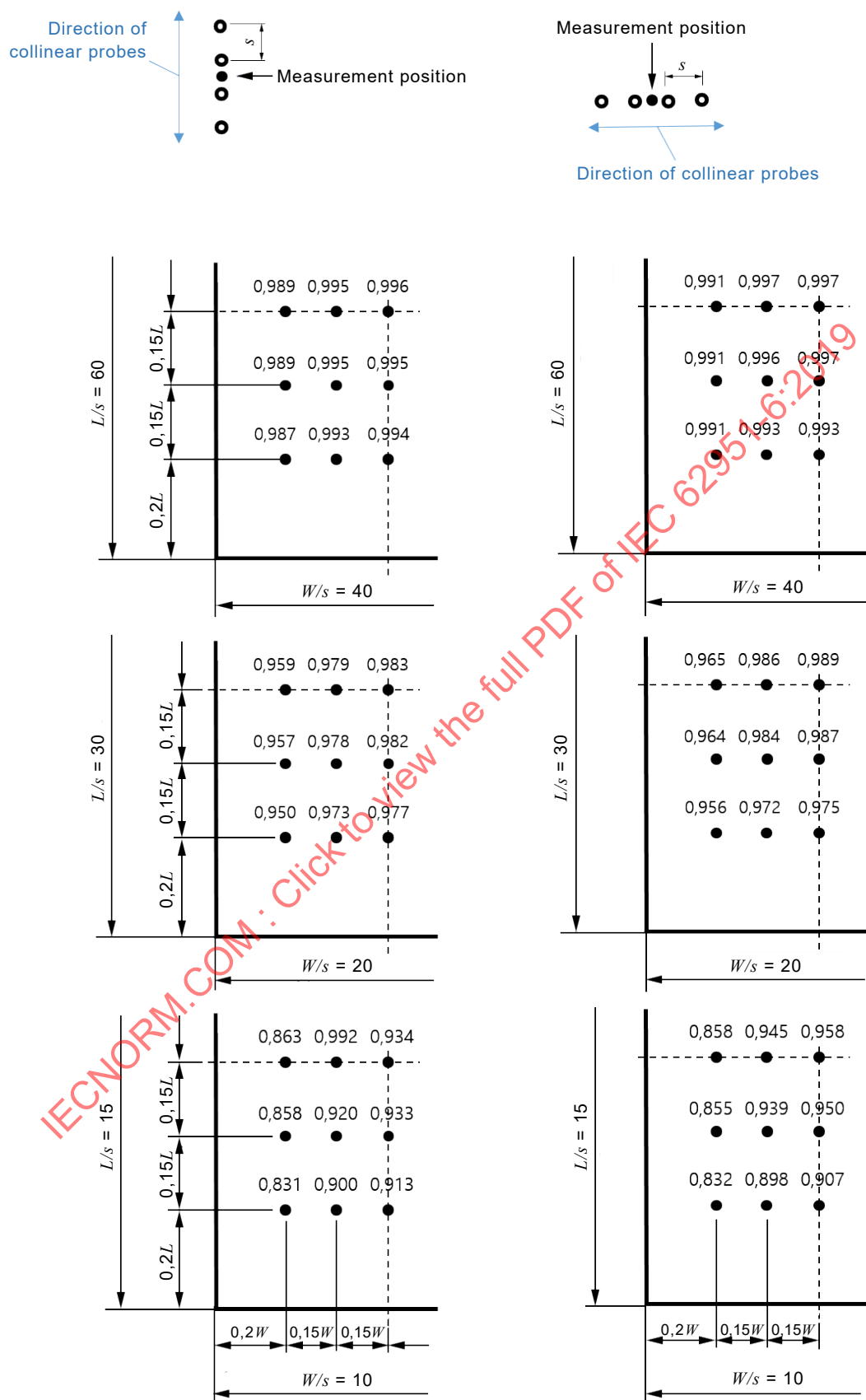


Figure B.5 – Correction factor, f depending on measuring positions and direction of collinear probes

B.3 Correction factors accounting for finite size probe tips

The sharp probe tip often scratches the soft conducting film (e.g. nanoparticle conducting film, nanowire coated film), which may result in inconsistent measurements of sheet resistance. To prevent this, a probe with a finite contact area equipped with internal springs is used. An example of this probe pin for the soft conducting film is shown in Figure B.6. In this case, the contact diameter is comparable to the inter-distance between probes and the additional correction factor for sheet resistance is required.

The finite diameter of the probe tips results in under-estimation of the measured sheet resistance for small electrode pitch, since it leads to an injection of the current over the whole contact area instead of a point-like injection.

The additional correction factor including the effect of finite contact diameter can be expressed as follows [2]¹:

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} f \times f_{\text{probe}} = 4,532 \frac{V}{I} f \times f_{\text{probe}} \quad (\text{B.6})$$

where

$$f_{\text{probe}} = \frac{1 + \frac{d}{s} (\sqrt{d/a_2} - 1)}{1 - A \frac{d}{s}};$$

$$A \approx \begin{cases} 0,77 + 0,074 \log(a_2 / d) & \text{for } a_2 / d < 1000 \\ 1 & \text{for } a_2 / d \geq 1000 \end{cases} \quad (\text{when } s / d > 2).$$

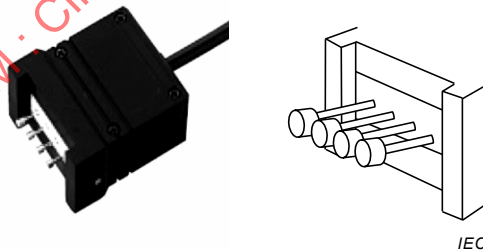


Figure B.6 – Example of probe with a finite contact diameter (e.g. 2mm) comparable to inter-distance between probes (e.g. 5 mm)

¹ Numbers in square brackets refer to the bibliography.

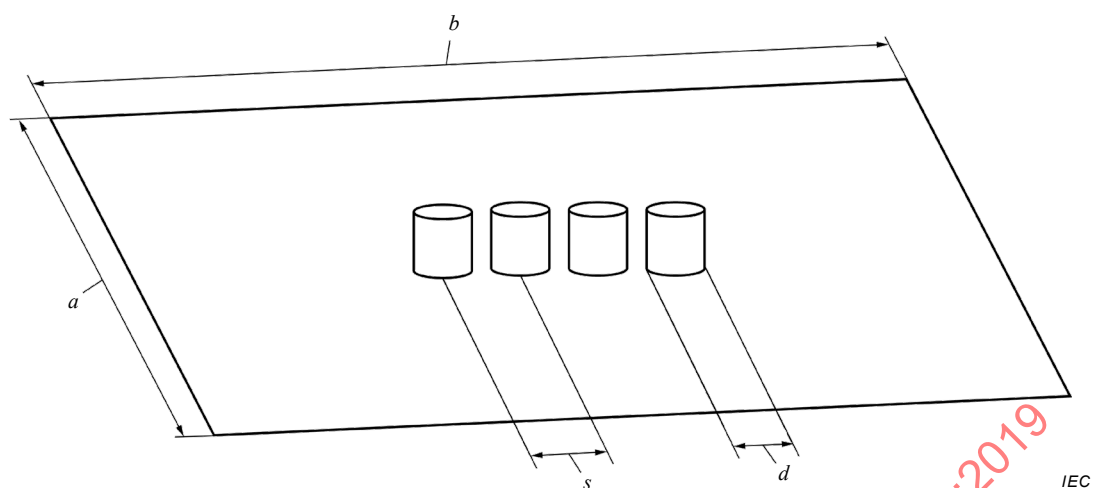


Figure B.7 – Dimensional sketch of probe with a finite contact diameter

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62951-6:2019

Annex C (informative)

Montgomery method

C.1 General

The Montgomery method is a technique used to measure the sheet resistance of a sample [3]. Its power lies in its ability to accurately measure the properties of a sample of any arbitrary to dimensional shape. The electrodes are placed on its perimeter and an anisotropic resistivity can be measured as well.

C.2 Sample preparation

In order to reduce errors in the calculations, it is preferable that the sample is symmetrical. The measurements require that four small ohmic contacts be placed on the boundary of the sample (or as close to it as possible). See Figure C.1.

Here, any errors given by their non-zero size will be of the order D/L , where D is the average size of the contact and L is the distance between the contacts. As shown in Figure C.2, if D/L is less than 0,15, the sheet resistance can be measured within the error of 1 %.

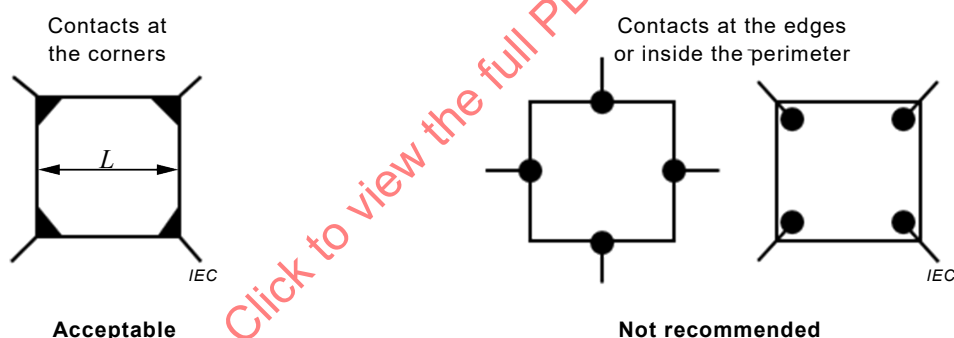


Figure C.1 – Possible contact placements of square or rectangular sample

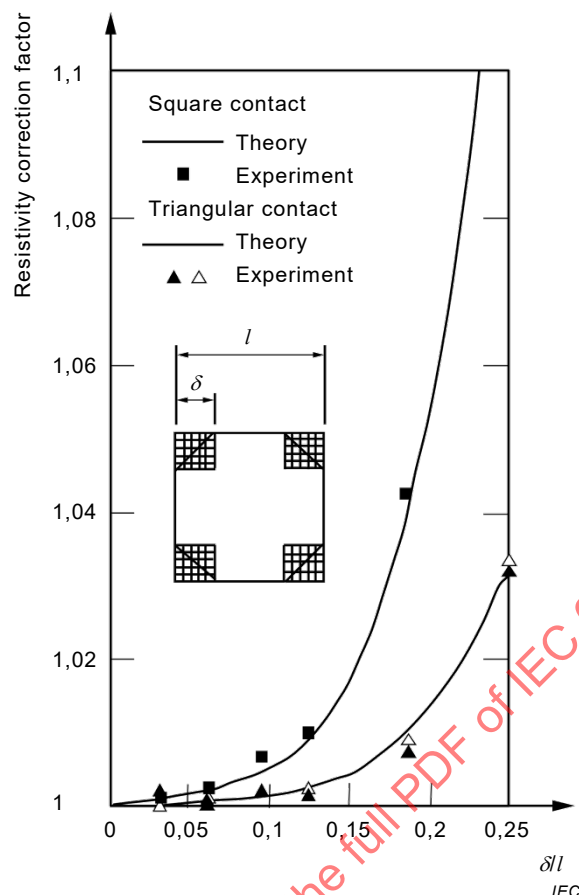


Figure C.2 – Correction factors for finite contact size on resistivity measurement [4]

C.3 Measurement of sheet resistance of isotropic sample

To make a measurement, a current is caused to flow along one edge of the sample (for instance, I_{12}) and the voltage across the opposite edge (in this case, V_{34}) is measured (refer to Figure C.3). From these two values, a resistance (for this example, $R_{12,34}$) can be found using Ohm's law:

$$R_{12,34} = \frac{V_{34}}{I_{12}} = R_{\text{vertical}} \quad (\text{C.1})$$

$$R_{23,41} = \frac{V_{41}}{I_{23}} = R_{\text{horizontal}} \quad (\text{C.2})$$

The van der Pauw formula showed that the sheet resistance of samples with arbitrary shapes can be determined from two of these resistances: one measured along a vertical edge, such as $R_{12,34}$ and a corresponding one measured along a horizontal edge, such as $R_{23,41}$. The actual sheet resistance, R_s , is related to these resistances by the van der Pauw formula:

$$\exp(-\pi R_{\text{vertical}} / R_s) + \exp(-\pi R_{\text{horizontal}} / R_s) = 1 \quad (\text{C.3})$$

A further improvement in the accuracy of the resistance values can be obtained by both reciprocal measurements and switching polarities.

$$R_{\text{vertical}} = \frac{R_{12,34} + R_{21,43} + R_{34,12} + R_{43,21}}{4} \quad (\text{C.4})$$

$$R_{\text{horizontal}} = \frac{R_{23,41} + R_{32,14} + R_{41,23} + R_{14,32}}{4} \quad (\text{C.5})$$

The sheet resistance, R_s can be obtained from the above van der Pauw formula, again.

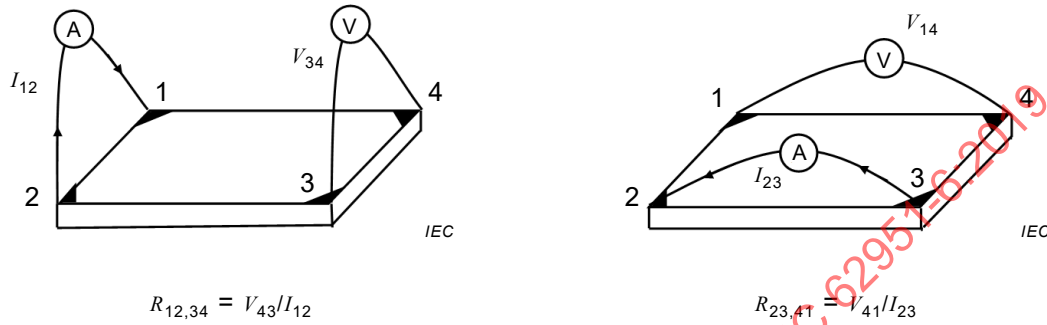


Figure C.3 – Resistance measurement of Montgomery method

If any of the reversed polarity measurements do not agree to a sufficient degree of accuracy (usually within 3 %) with the corresponding standard polarity measurement, then there is probably a source of error within the setup, which should be investigated before continuing. The same principle applies to the reciprocal measurements.

C.4 Measurement of anisotropic sheet resistance

In the case of an anisotropic sample, both the respective sheet resistances for both vertical and horizontal directions can be approximated as follows [5]:

$$R_{s,\text{vertical}} = \frac{\pi}{8} \frac{L_{23}}{L_{12}} R_{\text{horizontal}} F \sinh(\pi F) \quad (\text{C.6})$$

$$R_{s,\text{horizontal}} = \frac{\pi}{8} \frac{L_{23}}{L_{12}} R_{\text{horizontal}} \frac{\sinh(\pi F)}{F} \quad (\text{C.7})$$

where

$$F \approx \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\pi} \ln \frac{R_{\text{vertical}}}{R_{\text{horizontal}}} + \sqrt{\left(\frac{1}{\pi} \ln \frac{R_{\text{vertical}}}{R_{\text{horizontal}}} \right)^2 + 4} \right]$$

L_{12} and L_{23} are the vertical and horizontal lengths of the sample, respectively.

Bibliography

- [1] IEC 62951-1:2017, *Semiconductor devices – Flexible and stretchable semiconductor devices – Part 1: Bending test method for conductive thin films on flexible substrates*
- [2] F. M. Smits, *Measurement of Sheet Resistivities with the Four-Point Probe*, 37 (3) (1958) 711-718
- [3] K. Ilse, T. Tänzer, C. Hagendorf, M. Turek, *Geometrical correction factors for finite-size probe tips in microscopic four-point-probe resistivity measurements*, 116 (22) (2014) 224509
- [4] Montgome.Hc, *Method for Measuring Electrical Resistivity of Anisotropic Materials*, *J Appl Phys*, 42 (7) (1971) 2971-&
- [5] R. Chwang, B. J. Smith, C. R. Crowell, *Contact size effects on the van der Pauw method for resistivity and Hall coefficient measurement*, 17 (12) (1974) 1217-1227
- [6] C. A. M. dos Santos, A. de Campos, M. S. da Luz, B. D. White, J. J. Neumeier, B. S. de Lima, C. Y. Shigue, *Procedure for measuring electrical resistivity of anisotropic materials: A revision of the Montgomery method*, 110 (8) (2011)

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62951-6:2019

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	28
1 Domaine d'application	30
2 Références normatives	30
3 Termes et définitions	30
4 Conditions atmosphériques pour l'évaluation et le conditionnement.....	31
5 Mesurage sur site en utilisant la méthode de la sonde 2 points.....	32
5.1 Généralités	32
5.2 Préparation de l'échantillon.....	32
5.3 Méthodes d'essai	33
5.3.1 Appareillage d'essai	33
5.3.2 Mesurage et analyse des données.....	33
5.4 Consignation des résultats dans un rapport	34
6 Mesurage de l'uniformité en utilisant la méthode de la sonde 4 points	34
6.1 Généralités	34
6.2 Méthodes d'essai	34
6.2.1 Appareillage d'essai	34
6.2.2 Mesurage et analyse des données.....	35
6.3 Consignation des résultats dans un rapport	36
7 Mesurage anisotrope en utilisant la méthode de Montgomery	36
7.1 Généralités	36
7.2 Méthodes d'essai	36
7.2.1 Appareillage d'essai	36
7.2.2 Mesurage et analyse des données.....	37
7.3 Consignation des résultats dans un rapport	38
Annexe A (informative) Essais de courbure.....	39
Annexe B (informative) Mesurages avec une sonde 4 points.....	40
B.1 Généralités	40
B.2 Correction pour une taille finie d'échantillon.....	40
B.3 Facteurs de correction tenant compte de la taille finie des pointes de sonde.....	45
Annexe C (informative) Méthode de Montgomery	47
C.1 Généralités	47
C.2 Préparation de l'échantillon.....	47
C.3 Mesurage de la résistance de couche d'un échantillon isotrope	48
C.4 Mesurage de la résistance de couche anisotrope	49
Bibliographie.....	50
Figure 1 – Raccordement électrique possible pour un mesurage avec une sonde 2 points.....	32
Figure 2 – Section de référence de l'essai de courbure.....	34
Figure 3 – Exemple de positions de mesurage	35
Figure 4 – Direction de courbure et orientation des sondes colinéaires	36
Figure 5 – Mesurage de la résistance par la méthode de Montgomery	38
Figure A.1 – Deux méthodes d'essai de courbure courantes pour les substrats souples	39
Figure B.1 – Représentation schématique d'une sonde 4 points.....	40

Figure B.2 – Facteur de correction de l'échantillon carré selon sa longueur/l'espacement des sondes [2]	42
Figure B.3 – Facteur de correction selon la position de mesurage lorsque les sondes colinéaires sont orientées verticalement	43
Figure B.4 – Facteur de correction selon la position de mesurage lorsque les sondes colinéaires sont orientées horizontalement	43
Figure B.5 – Facteur de correction, f , selon les positions de mesurage et l'orientation des sondes colinéaires	44
Figure B.6 – Exemple de sonde avec un diamètre de contact fini (par exemple 2 mm) comparable à la distance entre les sondes (par exemple 5 mm)	45
Figure B.7 – Schéma dimensionnel d'une sonde avec un diamètre de contact fini.....	46
Figure C.1 – Positionnements possibles des contacts d'un échantillon carré ou rectangulaire.....	47
Figure C.2 – Facteurs de correction pour la taille de contact finie lors du mesurage de la résistivité [4]	48
Figure C.3 – Mesurage de la résistance par la méthode de Montgomery.....	49

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

DISPOSITIFS À SEMICONDUCTEURS – DISPOSITIFS À SEMICONDUCTEURS SOUPLES ET EXTENSIBLES –

Partie 6: Méthode d'essai pour la résistance de couche des couches conductrices souples

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, direct ou indirect, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale IEC 62951-6 a été établie par le comité d'études 47 de l'IEC: Dispositifs à semiconducteurs.

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

FDIS	Rapport de vote
47/2547/FDIS	47/2566/RVD

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

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

Une liste de toutes les parties de la série IEC 62951, publiées sous le titre général *Dispositifs à semiconducteurs – Dispositifs à semiconducteurs souples et extensibles*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

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

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

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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62951-6:2019

DISPOSITIFS À SEMICONDUCTEURS – DISPOSITIFS À SEMICONDUCTEURS SOUPLES ET EXTENSIBLES –

Partie 6: Méthode d'essai pour la résistance de couche des couches conductrices souples

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 62951 spécifie les termes, ainsi que la méthode et le rapport d'essai de la résistance de couche d'une couche conductrice souple soumise à des essais de courbure et de pliage. Les méthodes de mesurage comprennent la méthode de la sonde 2 points, la méthode de la sonde 4 points et la méthode de Montgomery, qui peuvent être appliquées à un mesurage sur site ou hors site et aux mesurages de résistance de couche anisotrope.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils 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).

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

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>

3.1

résistivité

inverse de la conductivité lorsque cet inverse existe

[SOURCE: IEC 60050-121:1998, 121-12-04]

3.2

R_s

résistance de couche

résistance des couches minces qui ont une épaisseur nominale uniforme, qui correspond à la résistivité divisée par l'épaisseur de la couche conductrice

3.3

résistance

pour un bipôle résistif, élémentaire ou non, de bornes A et B, quotient de la tension électrique (IEC 60050-131:2008, 131-11-56) u_{AB} entre les bornes par le courant électrique i dans le bipôle

$$R = \frac{u_{AB}}{i}$$

où le courant est positif si le sens du courant est de A vers B et négatif si son sens est de B vers A

Note 1 à l'article: Une résistance ne peut pas être négative.

Note 2 à l'article: Le terme «résistance» désigne aussi elliptiquement la résistance en courant alternatif (IEC 60050-131:2013, 131-12-45).

Note 3 à l'article: En français, le terme «résistance» désigne aussi un dispositif, en anglais «resistor» (voir IEC 60050-151:2001, 151-13-19).

Note 4 à l'article: L'unité SI cohérente de résistance est l'ohm, Ω .

[SOURCE: IEC 60050-131:2013, 131-12-04]

3.4

résistance de contact

résistance entre la surface d'un matériau et le contact électrique réalisé sur la surface

3.5

rayon

distance du centre d'un cercle à sa circonférence

Note 1 à l'article: Le rayon d'une sphère est celui d'un grand cercle.

[SOURCE: IEC 60050-113:2011, 113-01-25]

3.6

rayon de courbure

en un point d'une courbe, rayon du cercle osculateur

Note 1 à l'article: Le cercle osculateur est le cercle tangent à une courbe en un point, qui approche le mieux possible la courbe au voisinage de ce point.

[SOURCE: IEC 60050-113:2011, 113-01-30]

3.7

méthode de la sonde 2 points

méthode de mesurage de la résistivité d'un matériau, utilisant deux contacts électriques avec le matériau

Note 1 à l'article: La valeur mesurée dépend de la résistance de la sonde.

3.8

méthode de la sonde 4 points

méthode de mesurage de la résistivité d'un matériau, utilisant quatre contacts électriques avec le matériau

Note 1 à l'article: Cela évite de nombreux problèmes dus à la résistance de contact.

3.9

méthode de Montgomery

technique utilisée pour mesurer la résistivité d'un échantillon bidimensionnel en plaçant les électrodes à son périmètre

4 Conditions atmosphériques pour l'évaluation et le conditionnement

L'atmosphère normale pour l'évaluation (essai et mesurage) et le stockage de l'éprouvette doit être une température de $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ et une humidité relative de $(50 \pm 10)\%$, conformément à la classe d'atmosphère normale 2 spécifiée dans l'ISO 291:2008. Si un substrat polymère est utilisé pour une éprouvette revêtue d'une couche conductrice,

l'atmosphère normale pour l'évaluation doit être une température de $23\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ et une humidité relative de $(50 \pm 5)\%$, conformément à la classe d'atmosphère normale 1 spécifiée dans l'ISO 291:2008.

Si un conditionnement est nécessaire, une atmosphère normale telle que spécifiée ci-dessus doit s'appliquer.

5 Mesurage sur site en utilisant la méthode de la sonde 2 points

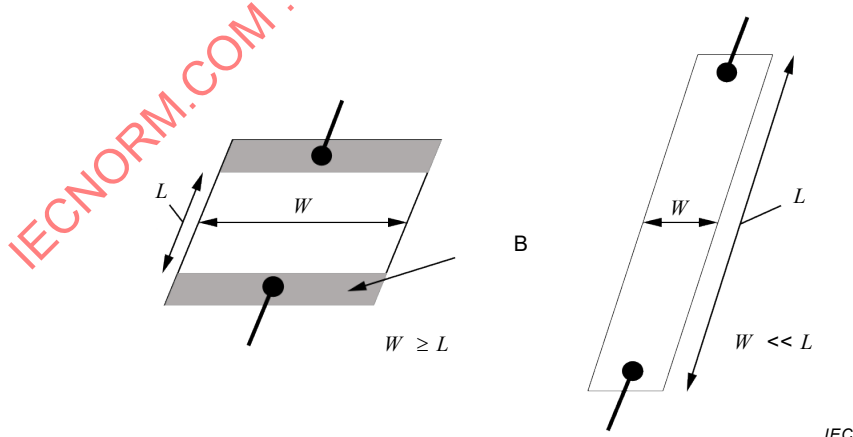
5.1 Généralités

La méthode de la sonde 2 points pour mesurer la résistance de couche d'une couche conductrice utilise deux contacts électriques. Il est bien connu que la valeur mesurée comprend l'erreur provoquée par la résistance de la sonde et la résistance de contact. Cependant, les autres méthodes (c'est-à-dire la méthode de la sonde 4 points et la méthode de Montgomery) ne sont pas pratiques ou sont impossibles à utiliser pour un mesurage sur site pendant l'essai de courbure ou de pliage. La méthode de la sonde 2 points est donc souvent nécessaire pour les mesurages sur site.

5.2 Préparation de l'échantillon

Pour réduire le plus possible l'erreur provoquée par la résistance de la sonde et la résistance de contact, il convient de respecter ce qui suit.

- Il convient que la résistance de l'échantillon soit 20 fois plus grande que la résistance de la sonde, afin de garantir une erreur inférieure ou égale à 5 % (par exemple, si la résistance de couche est d'environ 50 ohms/carré et que la résistance de la sonde est d'environ $5\ \Omega$, le rapport de la longueur sur la largeur, L/W , peut être supérieur à 2).
- Il convient que le contact électrique de la sonde soit solidement assuré à l'aide d'un adhésif fortement conducteur, tel que de la pâte d'argent.
- Lorsque la largeur, W , est comparable ou supérieure à la longueur, L , de l'échantillon, il convient que la barre conductrice soit solidement attachée à l'échantillon (en utilisant un adhésif fortement conducteur, tel que de la pâte d'argent) pour réduire le plus possible la résistance à la propagation dans le sens de la largeur. (voir la Figure 1)



Légende

- W largeur de l'échantillon
- L longueur de l'échantillon
- B barre conductrice

Figure 1 – Raccordement électrique possible pour un mesurage avec une sonde 2 points

5.3 Méthodes d'essai

5.3.1 Appareillage d'essai

L'évaluation appropriée pour des composants électroniques souples est la courbure de l'échantillon à un rayon donné. A cette fin, il est possible d'utiliser l'essai du rayon de pliage (voir l'IEC 62951-1) ou l'essai $X-Y-\theta$ (voir l'Annexe A). Il est noté qu'il convient de mesurer la section de référence (où le rayon de courbure r est observé) lors de l'essai du rayon de pliage.

Il est à noter que l'essai de pliage est également similaire à celui de courbure. La différence réside dans le fait qu'une déformation permanente se produit lors du pliage en raison du rayon de courbure relativement faible.

5.3.2 Mesurage et analyse des données

L'acquisition des données temporelles de résistance exige un multimètre numérique, dont il convient que la vitesse de relevé soit 10 fois plus rapide que la fréquence de courbure, afin de mesurer la variation de résistance sur un cycle de courbure. Il est à noter que le courant appliqué peut provoquer l'échauffement du matériau, qui peut en modifier la résistivité. Pour éviter ce problème, s'assurer que la résistance mesurée est constante dans le temps (il convient que la résistance moyenne ne dérive pas de plus de 10 % en quelques minutes).

Pour la méthode de la sonde 2 points, la résistance de couche, R_s , peut être calculée à partir de la résistance mesurée, R , comme indiqué par la Formule (1):

$$R_s = R \frac{W}{L} \quad (1)$$

De plus, il convient de mesurer le rayon de courbure en adaptant des cercles aux images optiques de la courbure (surtout lors de l'utilisation de l'essai du rayon de pliage). Lorsque toute la surface de l'échantillon ne suit pas le même rayon de courbure (Figure 2), la résistance de couche dans la section de référence peut être obtenue à partir de la résistance initiale, R_i comme indiqué par la Formule (2):

$$R_s = \left(R - R_i \frac{L - L_{\text{courbure}}}{L} \right) \frac{W}{L_{\text{courbure}}} \quad (2)$$

Après l'essai de courbure, il est recommandé de mesurer la résistance de couche de l'échantillon en utilisant une sonde 4 points. La comparaison des mesurages entre la sonde 2 points et la sonde 4 points peut permettre de s'assurer du bon raccordement électrique de la sonde 2 points après l'essai de courbure et peut encore réduire l'erreur de mesure de la sonde 2 points. Pour la même raison, il est également recommandé de mesurer la résistance de couche en utilisant une sonde 4 points avant l'essai de courbure.

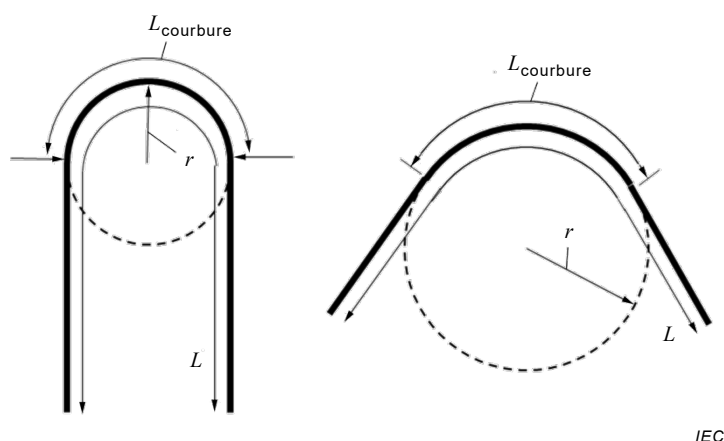


Figure 2 – Section de référence de l'essai de courbure

5.4 Consignation des résultats dans un rapport

Le rapport doit comprendre les éléments suivants:

- identification de l'éprouvette,
- date de l'essai,
- conditions atmosphériques de l'essai,
- rayon de courbure,
- dimension de l'échantillon et surface réelle de courbure (section de référence),
- fréquence de courbure,
- courbe temporelle de résistance de couche (ou résistance de couche équivalente sur la surface de courbure),
- déformation permanente par observation optique,
- (facultatif) mesurage de la sonde 4 points avant et après l'essai de courbure.

6 Mesurage de l'uniformité en utilisant la méthode de la sonde 4 points

6.1 Généralités

La méthode de la sonde 4 points est une technique de mesurage électrique qui utilise des paires distinctes d'électrodes porteuses de courant et sensibles à la tension pour réaliser des mesurages plus exacts que la détection plus simple par sonde 2 points. La séparation des électrodes de courant et de tension élimine la résistance des fils et la résistance de contact lors du mesurage. Les sondes 4 points peuvent mesurer avec exactitude une résistance inférieure à 100 Ω , de sorte qu'il s'agit d'une technique appropriée pour évaluer l'uniformité de la résistance de couche des couches minces.

6.2 Méthodes d'essai

6.2.1 Appareillage d'essai

Les résistances de couche sont mesurées en pressant des sondes 4 points colinéaires contre la surface de la couche. Un courant est appliqué entre les deux points extérieurs, alors que la tension est mesurée entre les deux points intérieurs.

Pour la couche conductrice souple sur un substrat souple, l'utilisation de la sonde colinéaire spéciale avec une surface de contact finie équipée de ressorts internes est recommandée. Un exemple de cette pointe de sonde est représenté à la Figure B.6.

6.2.2 Mesurage et analyse des données

A partir du courant induit, I , et de la tension mesurée, V , la résistance de couche est calculée par la formule suivante:

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} f = 4,5324 \frac{V}{I} f \quad (3)$$

Ici, f désigne le facteur de correction en considérant une taille finie de l'échantillon et une taille finie de la surface de contact de la sonde. Le facteur de correction est présenté en détail dans l'Annexe B. Voir la Figure B.1 et la Figure B.7.

Pour évaluer l'uniformité de la résistance de couche de la couche conductrice, de nombreux points de mesurage sont exigés. Il n'y a pas de plan privilégié pour les positions de mesurage, mais il est recommandé que les positions soient situées à une distance de 10 % à l'intérieur du bord. Un exemple de positions de mesurage est représenté à la Figure 3.

Dans le cas d'un long rouleau de couche conductrice souple, il est recommandé de mesurer les échantillons depuis les deux bouts, sans que ceux-ci ne correspondent avec les extrémités en périphérie du rouleau, puis d'évaluer l'uniformité.

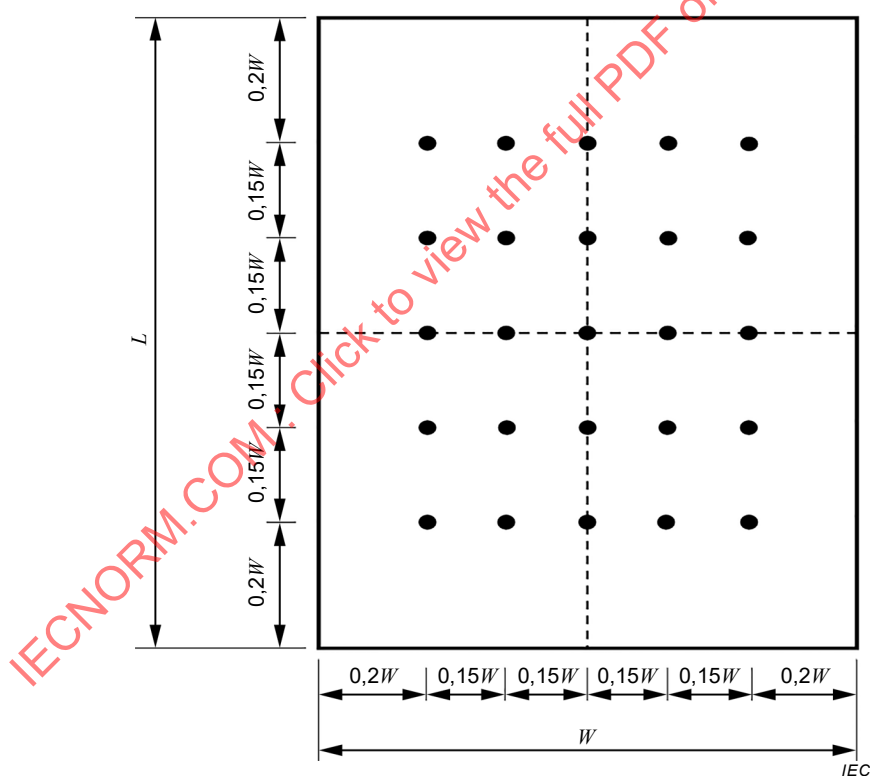
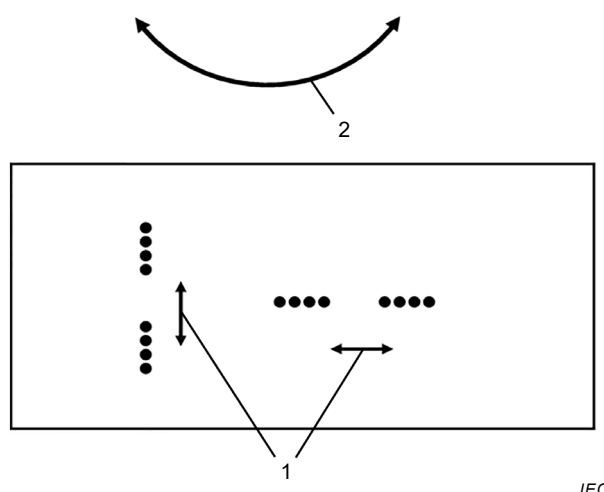


Figure 3 – Exemple de positions de mesurage

Dans le cas de l'échantillon après l'essai de courbure, une résistivité anisotrope peut apparaître. Il est donc recommandé de mesurer la résistance de couche avec des sondes colinéaires orientées dans les deux directions, parallèlement et perpendiculairement à la direction de courbure, comme indiqué dans la Figure 4.



Légende

- 1 orientation des sondes colinéaires
- 2 direction de courbure

Figure 4 – Direction de courbure et orientation des sondes colinéaires

6.3 Consignation des résultats dans un rapport

Le rapport doit comprendre les éléments suivants:

- a) identification de l'éprouvette,
- b) date de l'essai,
- c) conditions atmosphériques de l'essai,
- d) historique de l'échantillon,
- e) dimension de l'échantillon et positions de mesurage,
- f) orientation des sondes colinéaires,
- g) données sur la résistance de couche et informations statistiques d'uniformité,
- h) (facultatif) données sur le facteur de correction.

7 Mesurage anisotrope en utilisant la méthode de Montgomery

7.1 Généralités

La méthode de Montgomery est une technique utilisée pour mesurer la résistance de couche d'un échantillon. Son avantage réside dans sa capacité à mesurer avec exactitude la résistance de couche d'un échantillon et à mesurer également une résistivité anisotrope. Cependant, pour cette méthode, il convient de placer les électrodes sur le périmètre de l'échantillon, de façon à n'obtenir que la valeur moyenne. Voir l'Annexe C.

7.2 Méthodes d'essai

7.2.1 Appareillage d'essai

Un équipement électrique similaire à celui de la méthode de la sonde 4 points peut être utilisé. Comme la source de courant et le voltmètre doivent être commutés sur toutes les bornes de l'échantillon, il est recommandé d'utiliser un équipement à matrice de commutation pour automatiser le mesurage. Il convient que les contacts électriques soient établis dans les quatre coins de l'échantillon rectangulaire et il convient que la taille du contact soit 10 fois plus petite que la dimension de l'échantillon, pour garantir une erreur inférieure ou égale à 1 %.

7.2.2 Mesurage et analyse des données

Pour réaliser un mesurage, il convient qu'un courant circule le long d'un bord de l'échantillon (par exemple, I_{12} et I_{23}) et que la tension sur le bord opposé (dans le cas présent, V_{34} et V_{41} , respectivement) soit mesurée (voir la Figure 5). A partir de ces valeurs, une résistance (pour cet exemple, $R_{12,34}$ et $R_{23,41}$) peut être obtenue en utilisant la loi d'Ohm:

$$R_{12,34} = \frac{V_{34}}{I_{12}} \quad (4)$$

$$R_{23,41} = \frac{V_{41}}{I_{23}} \quad (5)$$

Ces mesurages sont répétés pour améliorer l'exactitude des valeurs de résistance et les résistances verticale et horizontale peuvent être obtenues de la manière suivante.

$$R_{\text{vertical}} = \frac{R_{12,34} + R_{21,43} + R_{34,12} + R_{43,21}}{4} \quad (6)$$

$$R_{\text{horizontal}} = \frac{R_{23,41} + R_{32,14} + R_{41,23} + R_{14,32}}{4} \quad (7)$$

Si l'un quelconque des mesurages de polarité inversée ne respecte pas un degré d'exactitude suffisant (en général inférieur ou égal à 3 %) avec le mesurage correspondant de polarité normale, il y a alors probablement une source d'erreur quelque part dans le montage, qu'il convient de rechercher avant de poursuivre. Le même principe s'applique aux mesurages réciproques.

Dans le cas d'un échantillon anisotrope, les résistances de couche respectives pour les directions verticale et horizontale peuvent être calculées de la manière suivante.

$$R_{s,\text{vertical}} = \frac{\pi}{8} \frac{L_{23}}{L_{12}} R_{\text{horizontal}} F \sinh(\pi F) \quad (8)$$

$$R_{s,\text{horizontal}} = \frac{\pi}{8} \frac{L_{23}}{L_{12}} R_{\text{horizontal}} \frac{\sinh(\pi F)}{F} \quad (9)$$

où:

$$F \approx \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\pi} \ln \frac{R_{\text{vertical}}}{R_{\text{horizontal}}} + \sqrt{\left(\frac{1}{\pi} \ln \frac{R_{\text{vertical}}}{R_{\text{horizontal}}} \right)^2 + 4} \right] \quad (10)$$

L_{12} et L_{23} désignent respectivement les longueurs verticale et horizontale de l'échantillon.

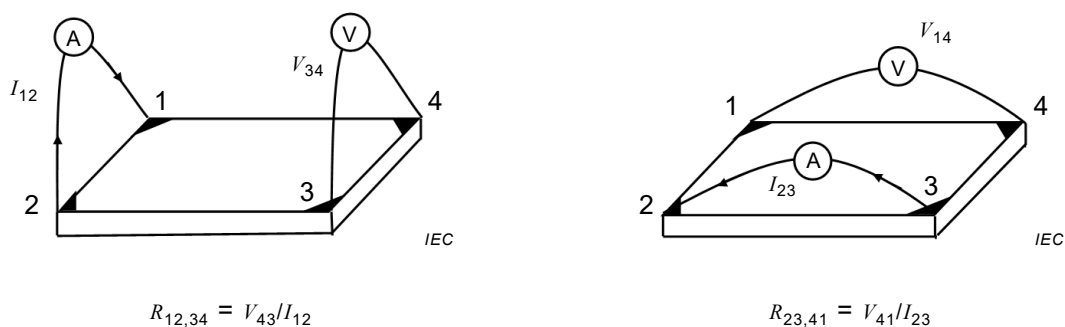


Figure 5 – Mesurage de la résistance par la méthode de Montgomery

7.3 Consignation des résultats dans un rapport

Le rapport doit comprendre les éléments suivants:

- a) identification de l'éprouvette,
- b) date de l'essai,
- c) conditions atmosphériques de l'essai,
- d) dimension de l'échantillon,
- e) données sur la résistance de couche directionnelle,
- f) (facultatif) données sur le facteur de correction,
- g) (facultatif) historique de l'échantillon (direction de courbure).

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62951-6:2019

Annexe A (informative)

Essais de courbure

L'évaluation appropriée pour des composants électroniques souples est la courbure de l'échantillon à un rayon donné. Pour cela, la technique la plus courante est l'essai du rayon de pliage, présenté en détail dans l'IEC 62951-1 (partie gauche de la Figure A.1). Dans l'essai du rayon de pliage, l'échantillon est soumis à un rayon de courbure, r (représenté dans la partie gauche de la Figure A.1), dans la section de référence uniquement, tandis que les autres surfaces sont soumises à un rayon de courbure différent de r . Dans l'essai X - Y - θ (partie droite de la Figure A.1, et également mentionné dans l'IEC 62951-1), l'extrémité de l'échantillon est positionnée sur les coordonnées de la circonférence, de sorte que toute la surface de l'échantillon soit soumise au même rayon de courbure r . Ainsi, l'essai X - Y - θ peut fournir une plus grande surface de mesurage électrique pour la même taille d'échantillon et permet également de mesurer la variation de la résistance de couche en fonction du rayon de courbure pendant l'essai de courbure.

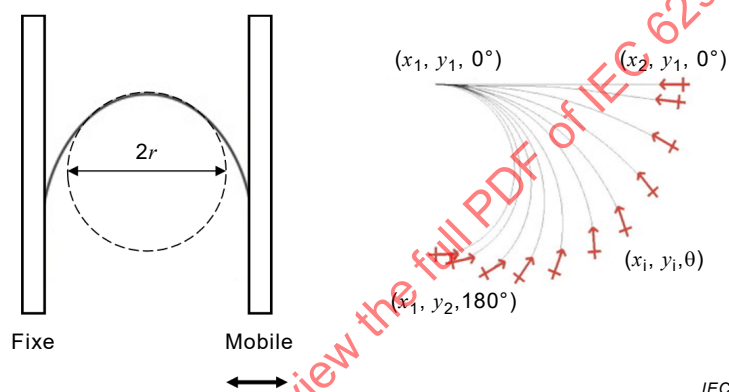


Figure A.1 – Deux méthodes d'essai de courbure courantes pour les substrats souples

Annexe B (informative)

Mesurages avec une sonde 4 points

B.1 Généralités

Les sondes étant centrées sur un échantillon très large (dimension latérale $\gg s$) et très mince (épaisseur $\ll s$), avec s désignant l'espacement des sondes, la résistance de couche est donnée par la formule suivante:

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} = 4,5324 \frac{V}{I} \quad (\text{B.1})$$

où:

I est le courant entre les sondes A et D;

V est la différence de potentiel mesurée entre les sondes B et C.

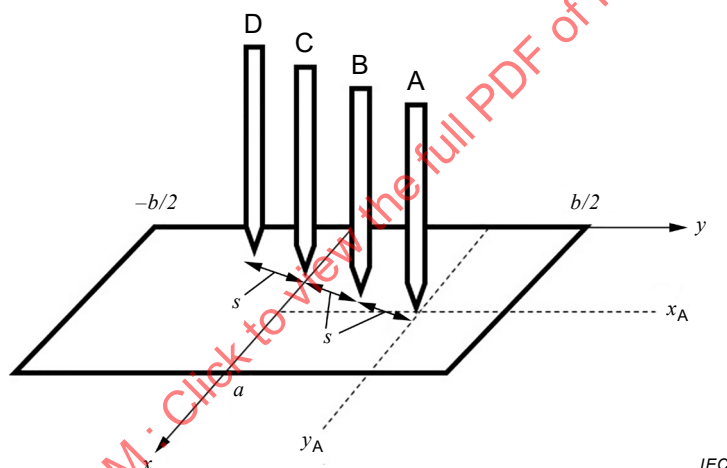


Figure B.1 – Représentation schématique d'une sonde 4 points

B.2 Correction pour une taille finie d'échantillon

Pour un échantillon de largeur finie, il convient de multiplier ceci par un facteur de correction pour une taille finie, f :

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} f = 4,5324 \frac{V}{I} f \quad (\text{B.2})$$

où:

f est le facteur de correction pour une largeur finie.

Le facteur de correction f peut être exprimé par la formule suivante:

$$\begin{aligned}
F^{-1} = & \frac{y_B - y_C}{a} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{a\zeta \sinh(b\zeta)} \left[\left\{ \cos(\zeta x_B) \cosh \left[\zeta \left(y_B + \frac{b}{2} \right) \right] - \cos(\zeta x_C) \cosh \left[\zeta \left(y_C + \frac{b}{2} \right) \right] \right\} \times \cos(\zeta x_A) \cosh \left[\zeta \left(y_A - \frac{b}{2} \right) \right] \right. \\
& - \left. \left\{ \cos(\zeta x_B) \cosh \left[\zeta \left(y_B - \frac{b}{2} \right) \right] - \cos(\zeta x_C) \cosh \left[\zeta \left(y_C - \frac{b}{2} \right) \right] \right\} \times \cos(\zeta x_D) \cosh \left[\zeta \left(y_D + \frac{b}{2} \right) \right] \right] \\
& + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{a\eta \sinh(b\eta)} \times \left[\left\{ \cosh \left[\eta \left(y_B + \frac{b}{2} \right) \right] - \cosh \left[\eta \left(y_C + \frac{b}{2} \right) \right] \right\} \times \cosh \left[\eta \left(y_A - \frac{b}{2} \right) \right] \right. \\
& - \left. \left\{ \cosh \left[\eta \left(y_B - \frac{b}{2} \right) \right] - \cosh \left[\eta \left(y_C - \frac{b}{2} \right) \right] \right\} \times \cosh \left[\eta \left(y_D + \frac{b}{2} \right) \right] \right] \\
& + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{a\zeta \sinh(b\zeta)} \times \left[\left\{ \cos(\zeta x_B) \cosh \left[\zeta \left(y_B + \frac{b}{2} \right) \right] - \cos(\zeta x_C) \cosh \left[\zeta \left(y_C + \frac{b}{2} \right) \right] \right\} \times \cos(\zeta x_A) \cosh \left[\zeta \left(y_A - \frac{b}{2} \right) \right] \right. \\
& - \left. \left\{ \cos(\zeta x_B) \cosh \left[\zeta \left(y_B - \frac{b}{2} \right) \right] - \cos(\zeta x_C) \cosh \left[\zeta \left(y_C - \frac{b}{2} \right) \right] \right\} \times \cos(\zeta x_D) \cosh \left[\zeta \left(y_D + \frac{b}{2} \right) \right] \right]
\end{aligned} \tag{B.3}$$

où:

$$F = \frac{\pi}{\ln 2} f = 4,532 \, 4 f \tag{B.4}$$

(x_A, y_A) correspond aux coordonnées x, y de la sonde A (cm);

(x_B, y_B) correspond aux coordonnées x, y de la sonde B (cm);

(x_C, y_C) correspond aux coordonnées x, y de la sonde C (cm);

(x_D, y_D) correspond aux coordonnées x, y de la sonde D (cm);

a, b désignent la longueur de la couche conductrice;

$\zeta = m\pi / a$ (m représente un nombre entier);

$\eta = n\pi / t$ (n représente un nombre entier, t représente l'épaisseur de la couche conductrice);

$$\zeta = (\zeta^2 + \eta^2)^{1/2}.$$

Si $t \ll s$ et que les sondes colinéaires sont orientées parallèlement à l'axe y (c'est-à-dire $x_A = x_B = x_C = x_D$), la Formule (B.3) se simplifie comme suit:

$$\begin{aligned}
F^{-1} = & \frac{s}{a} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2\cos^2(\zeta x_A)}{a\zeta \sinh(b\zeta)} \left[\left\{ \cosh \left[\zeta \left(y_B + \frac{b}{2} \right) \right] - \cosh \left[\zeta \left(y_C + \frac{b}{2} \right) \right] \right\} \times \cosh \left[\zeta \left(y_A - \frac{b}{2} \right) \right] \right. \\
& - \left. \left\{ \cosh \left[\zeta \left(y_B - \frac{b}{2} \right) \right] - \cosh \left[\zeta \left(y_C - \frac{b}{2} \right) \right] \right\} \times \cosh \left[\zeta \left(y_D + \frac{b}{2} \right) \right] \right] \\
& + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{a\eta} (e^{-s\eta} - e^{-2s\eta}) + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4\cos^2 \zeta x_A}{a\zeta} (e^{-s\zeta} - e^{-2s\zeta})
\end{aligned} \tag{B.5}$$

Les facteurs de correction représentatifs sont indiqués ci-après. Lorsqu'une sonde 4 points est placée au centre d'un échantillon carré, le facteur de correction, f , est calculé en utilisant la Formule (B.6), pour obtenir la Figure B.2.

La Figure B.3 et la Figure B.4 indiquent la variation du facteur de correction pour les échantillons longs en fonction des positions de mesure, ainsi que de l'orientation des sondes colinéaires.