

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Semiconductor devices – Micro-electromechanical devices –
Part 8: Strip bending test method for tensile property measurement of thin films**

**Dispositifs à semiconducteurs – Dispositifs microélectromécaniques –
Partie 8: Méthode d'essai de la flexion de bandes en vue de la mesure des
propriétés de traction des couches minces**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2011 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 la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: www.iec.ch

About the IEC

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

About IEC publications

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

- Catalogue of IEC publications: www.iec.ch/searchpub

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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: www.iec.ch/online_news/justpub

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

- Electropedia: www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary online.

- Customer Service Centre: www.iec.ch/webstore/custserv

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

Email: csc@iec.ch

Tel.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) 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 CEI

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

- Catalogue des publications de la CEI: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: www.iec.ch/online_news/justpub

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille deux fois par mois les nouvelles publications parues. Disponible en-ligne et aussi par email.

- Electropedia: www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International en ligne.

- Service Clients: www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

Email: csc@iec.ch

Tél.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Semiconductor devices – Micro-electromechanical devices –
Part 8: Strip bending test method for tensile property measurement of thin films**

**Dispositifs à semiconducteurs – Dispositifs microélectromécaniques –
Partie 8: Méthode d'essai de la flexion de bandes en vue de la mesure des
propriétés de traction des couches minces**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

R

ICS 31.080.99

ISBN 978-2-88912-395-7

CONTENTS

FOREWORD.....	3
1 Scope.....	5
2 Normative references	5
3 Terms and definitions	5
4 Test apparatus	5
4.1 General	5
4.2 Actuator	6
4.3 Load tip.....	6
4.4 Alignment mechanism	6
4.5 Force and displacement sensors	6
4.6 Test environment.....	6
5 Test piece	6
5.1 General.....	6
5.2 Shape of test piece	7
5.3 Measurement of test piece dimension.....	7
6 Test procedure and analysis.....	8
6.1 General.....	8
6.2 Data analysis	8
7 Test report.....	9
Annex A (informative) Data analysis: Test results by using nanoindentation apparatus	10
Annex B (informative) Test piece fabrication: MEMS process.....	13
Annex C (informative) Effect of misalignment and geometry on property measurement.....	15
Bibliography.....	18
Figure 1 – Thin film test piece.....	7
Figure 2 – Schematic of strip bending test	9
Figure A.1 – Three successive indents for determining the reference location of a test piece	10
Figure A.2 – A schematic view of nanoindentation apparatus.....	11
Figure A.3 – Actuator force vs. deflection curves for strip bending test and for leaf spring test.....	11
Figure A.4 – Force vs. deflection curve of a test piece after compensating the stiffness of the leaf spring.....	12
Figure B.1 – Fabrication procedure for test piece.....	13
Figure C.1 – Finite element analysis of errors based on the constitutive data of Au thin film of 1 μm thick	16
Figure C.2 – Translational (d) and angular (α , β , γ) misalignments	17
Table 1 – Symbols and designations of a test piece.....	7

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SEMICONDUCTOR DEVICES – MICRO-ELECTROMECHANICAL DEVICES –

Part 8: Strip bending test method for tensile property measurement of thin 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 62047-8 has been prepared by subcommittee 47F: Micro-electromechanical systems, of IEC technical committee 47: Semiconductor devices

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

FDIS	Report on voting
47F/71/FDIS	47F/77/RVD

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

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

A list of all parts of IEC 62047, under the general title *Semiconductor devices – Micro-electromechanical devices* can be found on the IEC website.

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

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

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 62047-8:2011

SEMICONDUCTOR DEVICES – MICRO-ELECTROMECHANICAL DEVICES –

Part 8: Strip bending test method for tensile property measurement of thin films

1 Scope

This international standard specifies the strip bending test method to measure tensile properties of thin films with high accuracy, repeatability, moderate effort of alignment and handling compared to the conventional tensile test. This testing method is valid for test pieces with a thickness between 50 nm and several μm , and with an aspect ratio (ratio of length to thickness) of more than 300.

The hanging strip (or bridge) between two fixed supports are widely adopted in MEMS or micro-machines. It is much easier to fabricate these strips than the conventional tensile test pieces. The test procedures are so simple to be readily automated. This international standard can be utilized as a quality control test for MEMS production since its testing throughput is very high compared to the conventional tensile test.

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application 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.

NONE

3 Terms and definitions

For the purposes of this document the following terms and definitions apply.

3.1 deflection

w

displacement of a test piece at the middle of the length, which is measured with respect to the straight line connecting two fixed ends of the test piece

3.2 deflection angle

β

angle between the deformed test piece and the straight line connecting two fixed ends of the test piece

NOTE Test piece in this document is often referred to as a strip bending specimen.

4 Test apparatus

4.1 General

A test apparatus is composed of an actuator, a load-sensor, a displacement sensor, and alignment mechanism as other mechanical testers such as micro-tensile tester and

nanoindentation apparatus. A test piece in a form of strip is very compliant and experiences large deflection under a small load when comparing it with a micro-tensile test piece with similar dimensions. In this respect, the load-sensor should have an excellent resolution and the displacement sensor should have a long measuring range. Details on each component of test apparatus are described as follows.

4.2 Actuator

All actuating devices that are capable of linear movement can be used for the test, e.g. piezoelectric actuator, voice coil actuator, servo motor, etc. However, a device with fine displacement resolution is highly recommended due to small dimensions of the test piece. The resolution shall be better than $1/1\ 000$ of maximum deflection of test piece.

4.3 Load tip

The load tip which applies a line contact force to the test piece is shaped like a conventional wedge type indenter tip and can be made of diamond, sapphire or other hard materials. The radius of the tip shall be comparable to or larger than the thickness of the test piece, and less than $L/50$ (refer to Annex C.3).

4.4 Alignment mechanism

The load tip shall be installed on the test apparatus aligned with the load and the displacement measuring axes, and the misalignment shall be less than 1 degree. The load tip shall be also aligned to the surface of the test piece with the deviation angles less than 1 degree (refer to Annex C for definition of deviation angles and error estimation of misalignment). It is desirable to equip the apparatus with tilt stages for adjusting the deviation angle. The load tip is to be positioned at the centre of the test piece and the positional accuracy shall be less than $L/100$.

4.5 Force and displacement sensors

Force and displacement sensors shall have resolutions better than $1/1\ 000$ of the maximum force and deflection during the test. The accuracy of the sensors shall be within $\pm 1\ %$ of the range. The displacement sensors can be capacitive type, LVDT type, or optical type with acceptable resolution and accuracy. In practice, the deflection can be measured from the motion of the load tip using a capacitive sensor or from the deflection of the test piece using an optical method.

4.6 Test environment

It is recommended to perform a test under constant temperature and humidity. Temperature change can induce thermal drift during deflection measurement. The temperature change or thermal drift shall be checked before and after the test.

5 Test piece

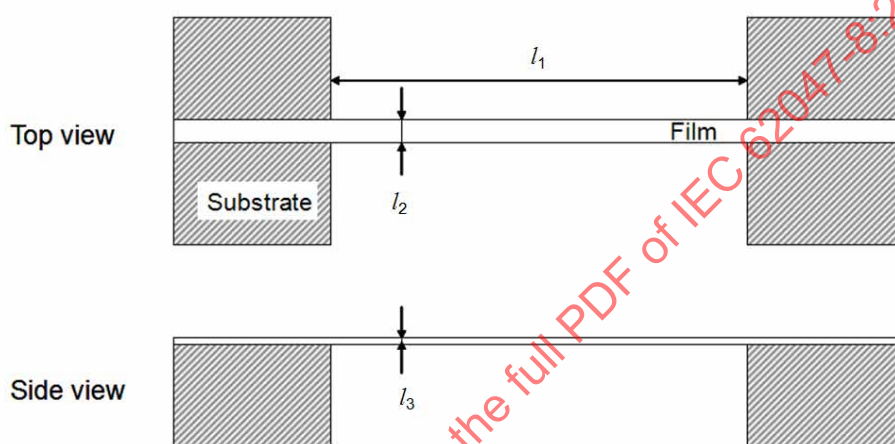
5.1 General

The test piece shall be prepared by using the same fabrication process as the actual device fabrication. To minimize the size effect of a test piece, the structure and size of the test piece shall be similar to those of the device components.

There are many fabrication methods of the test piece depending on the applications. As an example, the fabrication of the test piece based on MEMS process is described in Annex B. A lot of strip bending test pieces can be fabricated on a die or a substrate.

5.2 Shape of test piece

The shape of test piece and symbols are given in Figure 1 and Table 1, respectively. The test piece shall be designed to minimize the bending moment effect. In order to minimize the effect, the maximum deflection shall be more than 40 times the thickness of the test piece, and the length of the test piece shall be more than 300 times the thickness of the test piece, and the width shall be more than 10 times the thickness of the test piece, and the length shall be 10 times larger than the width. The thickness of the substrate shall be more than 500 times that of the test piece. The dimension of the substrate is limited by the capacity of the test apparatus. The geometry of the fixed ends supporting the test piece can affect the test results. When etching the sacrificial layer and the supporting substrate of test pieces, the region beneath the test pieces can be over-etched, and this is called by under-cut. The under-cut at the fixed ends shall be minimized (anisotropic etching would be desirable rather than isotropic etching).



IEC 499/11

Figure 1 – Thin film test piece

Table 1 – Symbols and designations of a test piece

Symbol	Unit	Designation
l_1	μm	Length of a test piece ($=2L$)
l_2	μm	Width of a test piece ($=B$)
l_3	μm	Thickness of a test piece ($=h$)

5.3 Measurement of test piece dimension

To analyze the test results, the accurate measurement of the test piece dimensions is required since the dimensions are used to extract mechanical properties of test materials. The length ($2L$), width (B), and thickness (h) shall be measured with very high accuracy with less than $\pm 5\%$ error. Useful information on thickness measurement can be found in Annex C of [1]¹ and in Clause 6 of [2].

¹ Figures in square brackets refer to the Bibliography.

6 Test procedure and analysis

6.1 General

- a) The substrate containing test pieces is attached to a sample holder. There are some recommendable methods for the sample attachment, such as magnetic attachment, electrostatic gripping, adhesive gluing, etc.
- b) The translational and angular misalignment between the load tip and the test piece can affect the test results (refer to Figure C.2), and should be checked using an optical microscope. The misalignment error and the guideline for alignment are described in Annex C.
- c) It is necessary to determine surface location of a test piece at the beginning of the test. The surface location is the position of the top surface of the test piece in the vertical direction when the strip deforms by the vertical movement of the load tip. This surface location can be determined by optical inspection using an optical microscope, or be determined by three successive indents. When the load tip touches the strip, the slight change in the strip configuration can be observed and identified using the optical microscope. The detailed method for determining the surface location using three successive indents is described in A.3.
- d) The test is performed under a constant displacement rate until the strip ruptures. The displacement rate of $L \times 10^{-4} / s$ or $L \times 10^{-3} / s$ is recommended, which leads to the strain rate of approximately $1 \times 10^{-5} / s$ or $1 \times 10^{-4} / s$, respectively when the strain reaches 0,5 %. This method applies to strain rate insensitive materials since the strain rate changes during the test.

6.2 Data analysis

To obtain an actual force and deflection data of a test piece from the experimental results, several compensations may be required depending on the test apparatus. As an example, the data analysis procedures are described in Annex A for the case of a nanoindentation apparatus. These procedures can provide useful information for other types of apparatus. From the force and deflection measurements, stress and strain can be estimated by the following Equations (1) and (2). The equations are derived on the assumptions of negligible bending moment effect and uniform strain throughout the test piece [1-3]. See Figure 2.

$$\sigma = \frac{F}{2Bh \sin \beta}, \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{L^2 + w^2}}{L} - 1. \quad (2)$$

Here, σ is the strip stress, ε is the strip strain, F is the force applied to a test piece during test and w is its corresponding deflection, β is defined as $\tan^{-1}(w/L)$. When L/h is larger than 300, these equations yield an excellent estimation of elastic modulus and yield strength as verified in Annex C. The effect of internal stress or residual stress could be considered with this method. When the internal stress exists, " F " in the equation (1) is affected by the internal stress and the strip stress changes also. The buckled test piece is excluded in this standard.

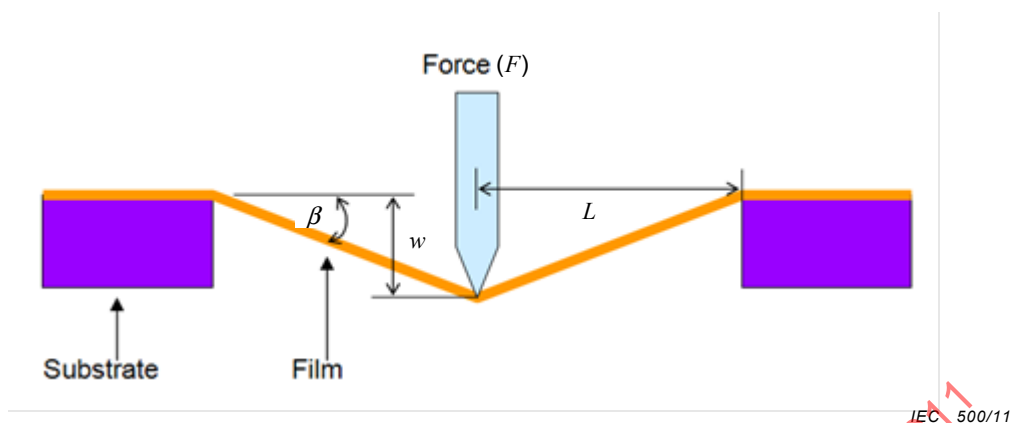


Figure 2 – Schematic of strip bending test

7 Test report

The test report shall contain at least the following information;

- a) reference to this international standard;
- b) identification number of the test piece;
- c) fabrication procedures of the test piece;
- d) test piece material;
 - in case of single crystal: crystallographic orientation
 - in case of poly crystal: texture and grain sizes
- e) test piece dimension and measurement method;
- f) description of testing apparatus;
- g) measured properties and results: elastic modulus, tensile strength, yield strength and stress-strain curve.

Annex A (informative)

Data analysis: Test results by using nanoindentation apparatus

A.1 Cause of errors

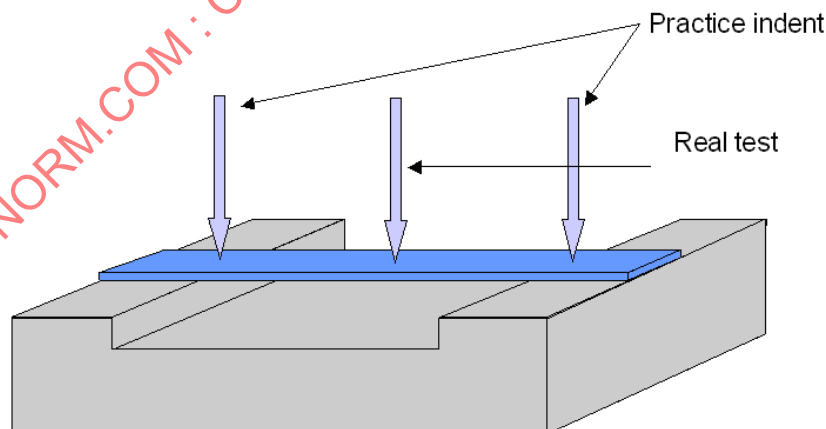
Thermal drift, difficulty of finding the surface location of the test piece and leaf spring stiffness of test apparatus can affect the test results.

A.2 Thermal drift compensation

Thermal drift is a common cause of error for a precise sensor measurement. This error is regarded as the result of thermal fluctuation from the test system. To measure thermal drift, the deflection is recorded for a period of time under a load controlled condition while a test piece is in contact with the wedge tip. Using the drift data, the deflection data of the strip bending test are corrected. This is a common compensation method of a nanoindentation test. Since the creep deformation is not clearly distinguished from the thermal drift, this compensation is not used in case of a test piece with creep behaviour.

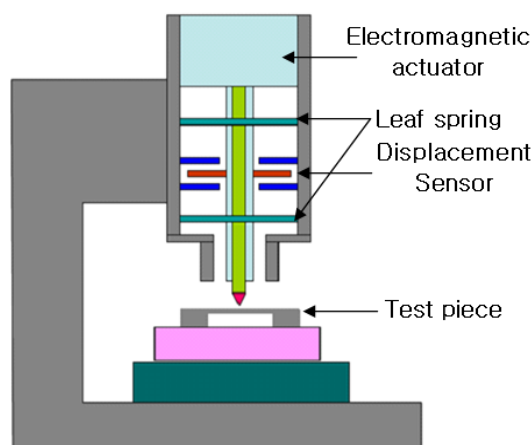
A.3 Determination of surface location

Finding the surface location of a test piece is very difficult since the stiffness change is too small to detect when the wedge tip is in contact with the test piece. As an alternative method, the surface locations of the two fixed strip ends to substrate are measured and the average value of the surface locations is taken as the surface location of the strip. See Figure A.1. This method can determine a reference surface location even for a wrinkled film caused by compressive residual stress. The deflection of a test piece is measured from that reference surface location.



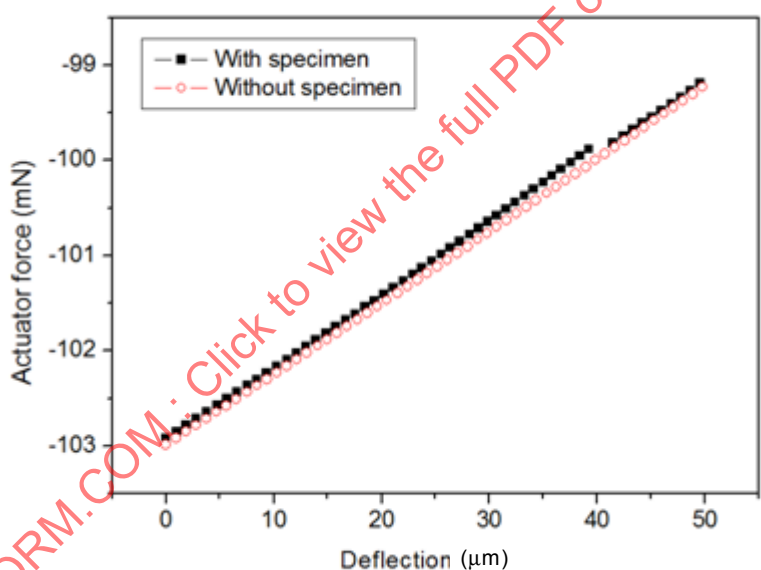
IEC 501/11

Figure A.1 – Three successive indents for determining the reference location of a test piece



IEC 502/11

Figure A.2 – A schematic view of nanoindentation apparatus



IEC 503/11

NOTE The test piece is Au film with a thickness of 0,1 μm, a width of 10 μm, and a length of 400 μm.

**Figure A.3 – Actuator force vs. deflection curves
for strip bending test and for leaf spring test**

A.4 Leaf spring stiffness compensation

Many commercial nanoindentation systems are utilizing a leaf spring to achieve a highly repeatable linear motion. See Figure A.2. This apparatus applies a force on a test piece by controlling the electric current supplied to the electromagnetic actuator. The actuator force is obtained from the electric current multiplied by load calibration constant. The actual force on a test piece can be determined by subtraction of the force for the leaf spring deformation from the actuator force. The leaf spring force can be measured by moving actuator without any test piece. This is represented by the open circle curve in Figure A.3. In order to compensate for the leaf spring force, the force-deflection data without a test piece are subtracted from the force-deflection data with a test piece (the filled square curve in Figure A.3). The actual force

signal on a strip can be determined by this procedure. See Figure A.4. The detailed information on the data analysis can be found in [3], [4] and [5].

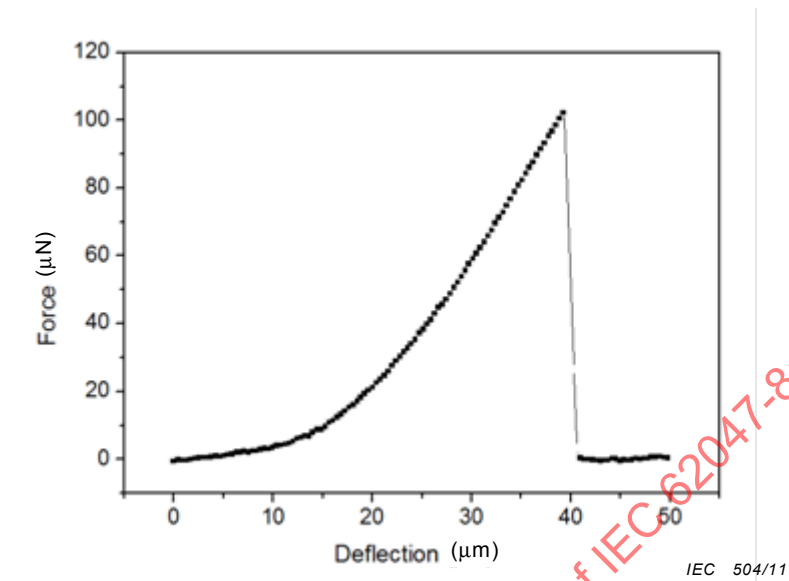


Figure A.4 – Force vs. deflection curve of a test piece after compensating the stiffness of the leaf spring

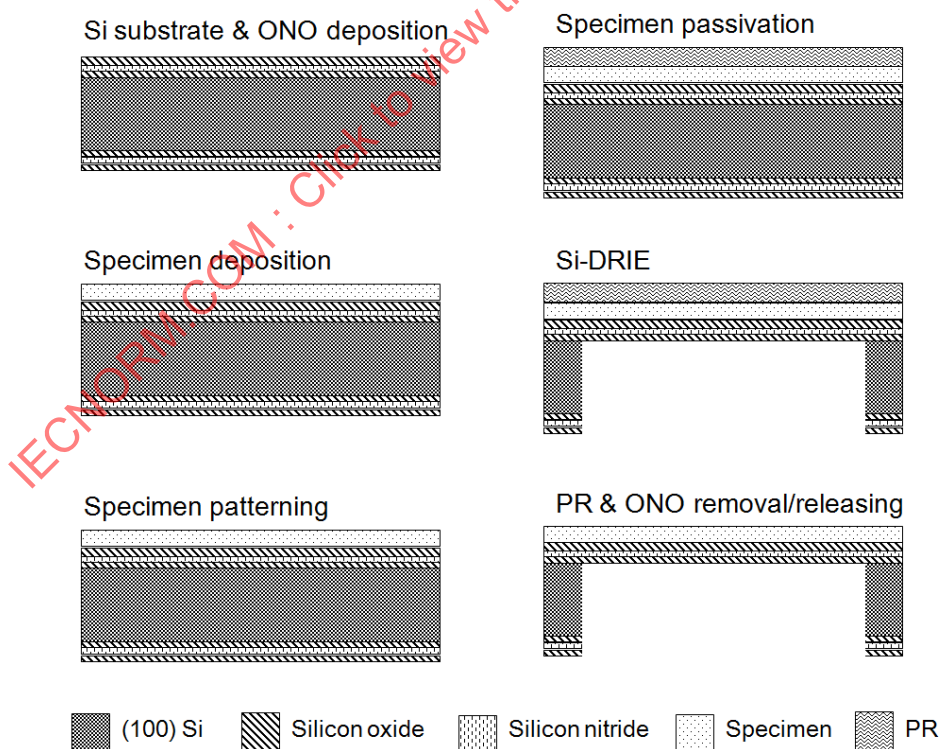
Annex B (informative)

Test piece fabrication: MEMS process

B.1 Test piece fabrication

MEMS processes are possible candidates for fabricating the test piece. Several types of MEMS process can be developed depending on the test materials and the devices. Figure B.1 introduces one example among the various MEMS processes. Detail descriptions are given below.

- a) deposit oxide film on a Si wafer.
- b) deposit a thin film of the test material on the oxide film. Au, Mo, SiN_x can be used as a test material. A glue layer may be deposited to improve adhesion between oxide film and thin film. The thickness of the glue layer must be carefully chosen to minimize its stiffness effect on the measurement.
- c) pattern the metal film to define the shape of a test piece. The patterning is done by a photolithography process.
- d) protect the patterned test piece by oxide or photoresist passivation layer.
- e) to make freestanding films, Si substrate is etched from back side by using deep RIE.
- f) freestanding film is obtained by removing photoresist and oxide.



IEC 505/11

Figure B.1 – Fabrication procedure for test piece

B.2 Measurement of shape of test piece

The shape of test piece can be measured by various methods. Stylus profilers or AFM (atomic force microscope) can be used to measure the thickness of a test piece. The width and length of a test piece are measured by electron microscope or even optical microscope. In case of a wrinkled film caused by compressive residual stress, the length between the fixed ends of strip to substrate is taken as the length of a test piece.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62047-8:2011

Annex C (informative)

Effect of misalignment and geometry on property measurement

C.1 Background

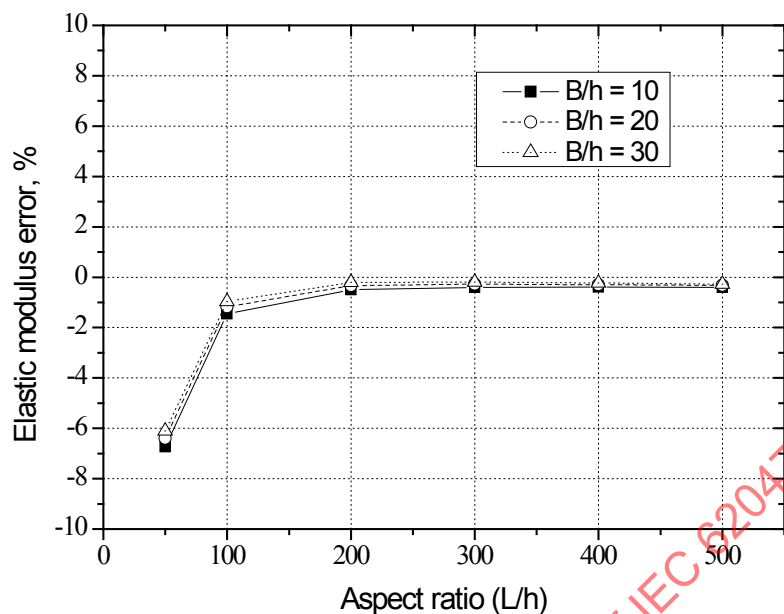
The results obtained by the strip bending test can be affected by several error sources. Some of them are the geometry of a test piece and others are translational and angular misalignments. Using finite element simulation, the effects of these error sources are estimated, and useful guidelines for the test are suggested. The test piece has three length parameters, length, width and thickness. The effects of these parameters are estimated under perfect alignment in terms of the error in elastic modulus and yield strength. The errors due to the translational and angular misalignments are estimated. The details on the simulation can be found in [6].

C.2 Finite element analysis

Three-dimensional finite element models are generated for the strip bending test pieces and are simulated using commercial finite element software, such as e.g. ABAQUS. By performing a mesh convergence study, the suitable finite element model is selected, which gives a convergent numerical solution. The material properties are adopted from the tensile test results [7] of Au thin film with a thickness of 1 μm , and the constitutive models for the simulation are elasticity and incremental plasticity. Using the finite element simulation, the force and deflection data for a test piece are extracted, and the corresponding stress and stress data are evaluated using the equations in 4.2. Elastic modulus and yield strength (0,2% offset) can be calculated from the evaluated stress-strain data. The error is estimated from the difference between the calculated ones and the simulation inputs.

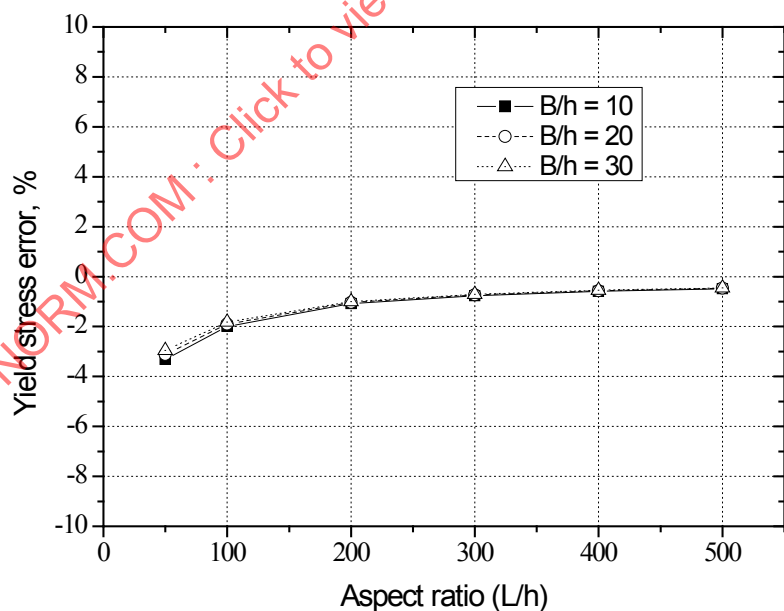
C.3 Analysis results

The errors in elastic modulus and yield strength under perfect alignment are estimated from the finite element analysis and are plotted in Figure C.1. As the increase in length/thickness ratio, the errors in elastic modulus and yield strength decreases, and the estimated properties are a little less than the actual properties. When the length/thickness ratio is larger than 300, the errors become less than 1 %.



IEC 506/11

Figure C.1a) Finite element analysis of errors in elastic modulus with respect to aspect ratio (= length/thickness)



IEC 507/11

Figure C.1b) Finite element analysis of errors in yield strength evaluation with respect to aspect ratio (= length/thickness)

Figure C.1 – Finite element analysis of errors based on the constitutive data of Au thin film of 1 μm thick

The translational and angular misalignments are also analyzed for the configuration shown in Figure C.2. Based on the simulation results, it is found that the effect of the translational misalignment (d) on elastic modulus and strength is less than 0,1% when d is less than $L/100$. Among the angular misalignments, α has the most significant effect on the results, and the error caused by α increases as the width, B . When B/h is 10 and α is less than 1 degree, the errors in elastic modulus and yield strength is less than 0,5 %. The effects of β and γ on the elastic modulus and yield strength is less than 0,1 % when they are less than 1 degree.

The effect of the load-tip radius on elastic modulus and strength evaluation is also estimated. As the radius increases, the errors in elastic modulus and strength also increase. The error in strength grows faster than that in elastic modulus. When the radius is less than $L/50$, the errors are less than 0,5 %.

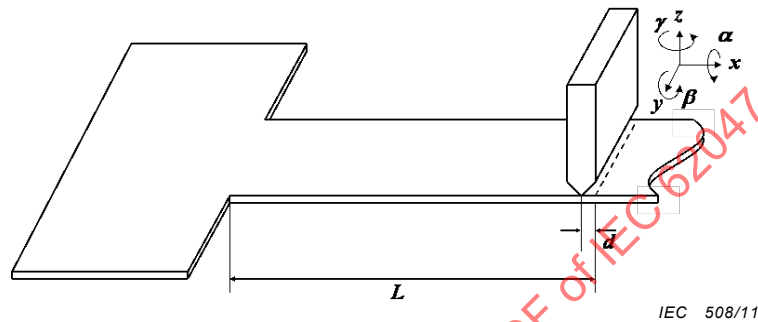


Figure C.2 – Translational (d) and angular (α , β , γ) misalignments

Bibliography

- [1] IEC 62047-2:2006, *Semiconductor devices – Micro-electromechanical devices – Part 2: Tensile testing method of thin film materials.*
- [2] IEC 62047-3:2006, *Semiconductor devices – Micro-electromechanical devices – Part 3: Thin film standard test piece for tensile testing.*
- [3] Espinosa, H. D., Prorok, B. C., Fisher, M., *A methodology for determining mechanical properties of freestanding thin films and MEMS materials*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 51 (2003), pp. 47-67.
- [4] Baek, C. W., Kim, J. M., Kim, Y. K., Kim, J.-H., Lee, H.-J., Han, S.-W., *Mechanical Characterization of Gold Thin Films Based on Strip Bending and Nanoindentation Test for MEMS/NEMS Applications*, Sensors and Materials, Vol. 17 (2005), pp. 277-288.
- [5] Kim, J.-H., Lee, H.-J., Han, S.-W., Kim, J. M., Baek, C. W., *Residual Stress Evaluation of Thin Film Using Strip Bending Test*, Key Engineering Materials, Vols. 321-323 (2006), pp. 121-124.
- [6] Park, J.-M., Kim, J.-H., Lee, H.-J., *A study on error sources of strip bending test using finite element analysis*, Proc. of KSPE 2007 fall meeting (2007).
- [7] Lee, S.-J., Hyun, S.-M., Han, S.-W., Lee, H.-J., Kim, J. H., Kim, Y. I., *A Study of Mechanical Behavior of Au Films by Visual Image Tracing System*, Advanced Materials Research, Vols. 26-28 (2007), pp. 1117-1120.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF IEC 62047-8:2011

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62047-8:2017

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	21
1 Domaine d'application	23
2 Références normatives	23
3 Termes et définitions	23
4 Appareillage d'essai	24
4.1 Généralités	24
4.2 Actionneur	24
4.3 Extrémité de charge	24
4.4 Mécanisme d'alignement	24
4.5 Capteurs de force et de déplacement	24
4.6 Environnement d'essai	24
5 Éprouvette d'essai	25
5.1 Généralités	25
5.2 Forme de l'éprouvette d'essai	25
5.3 Mesure des dimensions de l'éprouvette d'essai	26
6 Procédure d'essai et analyse	26
6.1 Généralités	26
6.2 Analyse de données	26
7 Rapport d'essai	27
Annexe A (informative) Analyse de données: Résultats d'essai au moyen de l'appareil de nanopénétration	28
Annexe B (informative) Fabrication de l'éprouvette d'essai: procédé MEMS	31
Annexe C (informative) Effet de désalignement et géométrie sur la mesure des propriétés	33
Bibliographie	36
Figure 1 – Eprouvette d'essai en couche mince	25
Figure 2 – Schéma d'essai de courbure de bande	27
Figure A.1 – Trois encoches successives en vue de déterminer l'emplacement de référence d'une éprouvette	28
Figure A.2 – Vue schématique d'un appareil de nanopénétration	29
Figure A.3 – Courbes de force de l'actionneur par rapport à la flèche pour l'essai de courbure de bande et pour l'essai de ressort à lames	29
Figure A.4 – Courbe de force par rapport à la flèche d'une éprouvette après la compensation de la rigidité du ressort à lames	30
Figure B.1 – Procédure de fabrication de l'éprouvette d'essai	32
Figure C.1 – Analyse par éléments finis des erreurs fondée sur les données constitutives de la couche mince en Au de 1 µm d'épaisseur	34
Figure C.2 – Désalignements de translation (d) et angulaires (α , β , γ)	35
Tableau 1 – Symboles et désignations d'une éprouvette d'essai	25

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

DISPOSITIFS À SEMICONDUCTEURS – DISPOSITIFS MICROÉLECTROMÉCANIQUES –

Partie 8: Méthode d'essai de la flexion de bandes en vue de la mesure des propriétés de traction des couches minces

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI 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, la CEI – 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 la CEI"). 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 la CEI, participent également aux travaux. La CEI 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 la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI 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 la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI 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 la CEI. La CEI 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 la CEI, 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 la CEI, 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 la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, 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 la CEI peuvent faire l'objet de droits de brevet. La CEI 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 CEI 62047-8 a été établie par le sous-comité 47F: Dispositifs micro-électromécaniques, du comité d'études 47 de la CEI: Dispositifs à semiconducteurs

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
47F/71/FDIS	47F/77/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.

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

Une liste de toutes les parties de la CEI 62047, sous le titre générale *Dispositifs à semiconducteurs - Dispositifs microelectromecaniques* peut être consultée sur le site web de la CEI.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de la CEI 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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62047-8:2011

DISPOSITIFS À SEMICONDUCTEURS – DISPOSITIFS MICROÉLECTROMÉCANIQUES –

Partie 8: Méthode d'essai de la flexion de bandes en vue de la mesure des propriétés de traction des couches minces

1 Domaine d'application

La présente norme internationale spécifie la méthode d'essai de flexion de bandes, afin de mesurer les propriétés de traction des couches minces avec une haute précision, répétabilité, un effort modéré d'alignement et de manipulation en comparaison de l'essai de traction conventionnel. La méthode d'essai est valable pour les éprouvettes d'essai dont l'épaisseur est comprise entre 50 nm et plusieurs μm , et dont le rapport, (soit le rapport de la longueur de l'éprouvette à son épaisseur) est supérieur 300.

La bande suspendue (ou le pont) entre deux supports fixés est largement adoptée dans les MEMS¹ ou dans les micromachines. Ces bandes sont bien plus faciles à fabriquer que les éprouvettes d'essai à la traction conventionnelles. Les procédures d'essai sont si simples qu'elles sont aisément automatisées. La présente norme internationale peut être utilisée en tant qu'essai de contrôle de la qualité pour la production des MEMS étant donné que son débit d'essai est très élevé comparé à l'essai de traction conventionnel.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application 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).

NA

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document les termes et les définitions suivants s'appliquent

3.1 flèche

w

déplacement d'une éprouvette d'essai au milieu de la longueur, que l'on mesure par rapport à la ligne droite reliant deux extrémités fixes de l'éprouvette d'essai

3.2 angle de flèche

β

angle formé entre l'éprouvette d'essai déformée et la ligne droite reliant deux extrémités fixes de l'éprouvette d'essai

NOTE L'éprouvette d'essai dans le présent document est souvent appelée éprouvette de flexion de bande.

¹ MEMS = *systèmes microélectromécaniques*.

4 Appareillage d'essai

4.1 Généralités

Un appareil d'essai est composé d'un actionneur, d'un capteur de charge, d'un capteur de déplacement, et d'un mécanisme d'alignement, comme autres machines d'essai mécaniques telles que les machines d'essai de micro-traction et les appareils de nanopénétration. Une éprouvette d'essai sous la forme d'une bande est très élastique et connaît une grande flèche sous une petite charge, lorsqu'on la compare à une éprouvette d'essai de micro-traction de dimensions analogues. À cet égard, il convient que le capteur de charge comporte une excellente résolution et que le capteur de déplacement possède une longue étendue de mesure. Les détails portant sur chaque composant de l'appareillage d'essai sont formulés comme suit.

4.2 Actionneur

Tous les dispositifs d'actionnement qui sont capables de mouvement linéaire peuvent être utilisés pour l'essai, par exemple l'actionneur piézoélectrique, l'actionneur de bobine acoustique, le servomoteur, etc. Toutefois, un dispositif doté d'une résolution de déplacement fine est hautement recommandé en raison des petites dimensions de l'éprouvette d'essai. Il convient que la résolution soit supérieure à 1/1 000 de la flèche maximale de l'éprouvette d'essai.

4.3 Extrémité de charge

L'extrémité en charge qui applique une force de contact de ligne à l'éprouvette d'essai est formée comme une pointe de pénétrateur de type coin conventionnelle et elle peut être réalisée en diamant, saphir ou autres matériaux durs. La valeur du rayon de l'extrémité doit être comparable ou supérieure à la valeur de l'épaisseur de l'éprouvette d'essai, et inférieure à $L/50$ (se reporter à l'Annexe C.3).

4.4 Mécanisme d'alignement

L'extrémité de charge doit être installée sur l'appareil d'essai aligné avec la charge et les axes de mesure du déplacement, et le défaut d'alignement doit être inférieur à 1 degré (se reporter à l'Annexe C qui porte sur l'estimation d'erreur de désalignement). L'extrémité de charge doit également être alignée à la surface de la pièce d'essai dont les angles d'écart sont inférieurs à 1 degré (se reporter à l'Annexe C dans laquelle sont définis les angles d'écart et l'estimation d'erreur de désalignement). Il est souhaitable d'équiper l'appareil de phases d'inclinaison, en vue d'ajuster l'angle de déviation. L'extrémité de charge doit être placée au centre de l'éprouvette d'essai et la précision de position doit être inférieure à $L/100$.

4.5 Capteurs de force et de déplacement

Les capteurs de force et de déplacement doivent comporter des résolutions supérieures à 1/1 000 de la force maximale et de la flèche maximale au cours de l'essai. La précision des capteurs doit se situer à $\pm 1 \%$ de la plage. Les capteurs de déplacement peuvent être de type capacitif, de type LVDT, ou de type optique avec une résolution et une précision acceptables. En pratique, la flèche peut être mesurée à partir du mouvement de l'extrémité de charge au moyen d'un capteur capacitif ou à partir de la flèche de l'éprouvette d'essai au moyen de la méthode optique.

4.6 Environnement d'essai

Il est recommandé de réaliser un essai sous une température et une humidité constantes. La variation de température peut induire une dérive thermique au cours de la mesure de la flèche. Il faut vérifier toute variation de température ou dérive thermique avant et après l'essai.

5 Éprouvette d'essai

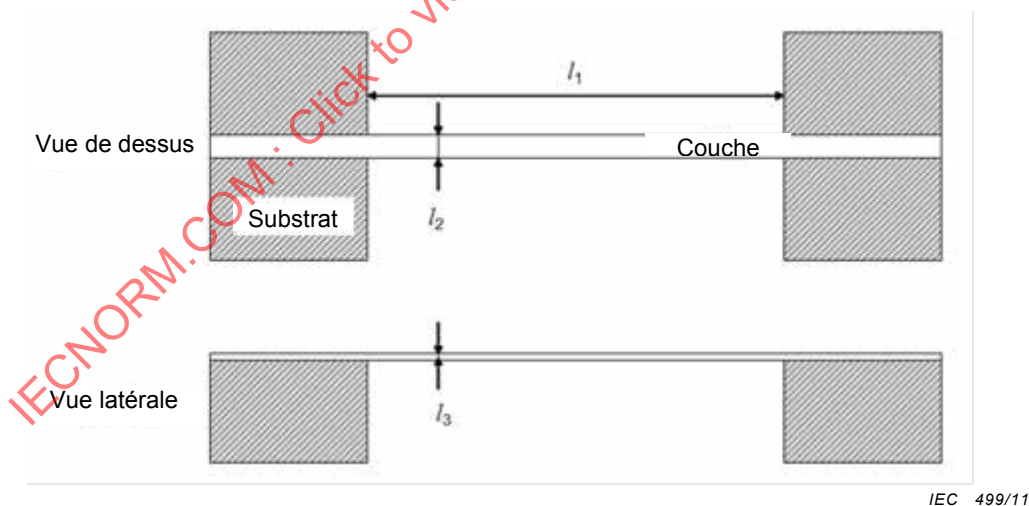
5.1 Généralités

L'éprouvette d'essai doit être préparée au moyen du même procédé de fabrication que le procédé de fabrication réel du dispositif. Pour minimiser l'effet lié à la taille d'une éprouvette d'essai, la structure et la taille de l'éprouvette d'essai doivent être similaires à celles des composants du dispositif.

Il existe de nombreuses méthodes de fabrication de l'éprouvette en fonction des applications. À titre d'exemple, la fabrication de l'éprouvette d'essai fondée sur le procédé MEMS est décrite dans l'Annexe B. Un lot d'éprouvettes d'essai de bande peut être fabriqué sur une puce ou un substrat.

5.2 Forme de l'éprouvette d'essai

La forme de l'éprouvette d'essai et les symboles sont donnés respectivement dans la Figure 1 et au Tableau 1. L'éprouvette d'essai doit être conçue pour minimiser l'effet du moment de flexion. Afin de minimiser l'effet, la flèche maximale doit être supérieure à 40 fois l'épaisseur de l'éprouvette d'essai, et que la longueur de l'éprouvette d'essai doit être supérieure à 300 fois l'épaisseur de l'éprouvette d'essai, et que la largeur doit être supérieure à 10 fois l'épaisseur de l'éprouvette d'essai, et que la longueur doit être 10 fois plus grande que la largeur. L'épaisseur du substrat doit être supérieure à 500 fois celle de l'éprouvette. La dimension du substrat est limitée par la capacité de l'appareillage d'essai. La géométrie des extrémités fixes supportant l'éprouvette d'essai peut influencer sur les résultats d'essai. Lors de la gravure de la couche sacrificielle et du substrat de support des éprouvettes d'essai la région située au-dessous des éprouvettes d'essai peut être sur-gravée, et ceci est désigné par gravure sous-jacente. La gravure sous-jacente aux extrémités fixes doit être minimisée (la gravure anisotrope sèche serait souhaitable plutôt que la gravure humide anisotropique).



IEC 499/11

Figure 1 – Eprouvette d'essai en couche mince

Tableau 1 – Symboles et désignations d'une éprouvette d'essai

Symbole	Unité	Désignation
l_1	μm	Longueur d'une éprouvette d'essai ($=2L$)
l_2	μm	Largeur d'une éprouvette d'essai ($=B$)
l_3	μm	Épaisseur d'une éprouvette d'essai ($=h$)

5.3 Mesure des dimensions de l'éprouvette d'essai

Pour analyser les résultats d'essai, la mesure précise des dimensions de l'éprouvette d'essai est exigée étant donné que les dimensions sont utilisées pour dégager les propriétés mécaniques des matériaux d'essai. La longueur ($2L$), la largeur (B), et l'épaisseur (h) doivent être mesurés avec une très haute précision comportant moins de $\pm 5\%$ d'erreur. Des informations utiles portant sur la mesure de l'épaisseur figurent à l'Annexe C du [1]² et dans l'Article 6 du [2].

6 Procédure d'essai et analyse

6.1 Généralités

- Le substrat contenant les éprouvettes d'essai est fixé au porte-échantillon. Il existe certaines méthodes recommandables pour la fixation des échantillons, telles que la fixation magnétique, la préhension électrostatique, le collage adhésif, etc.
- Le désalignement de translation et angulaire entre l'extrémité de charge et l'éprouvette d'essai peut influencer sur les résultats d'essai (se reporter à la Figure C.2), et il convient d'en effectuer la vérification à l'aide d'un microscope optique. L'erreur de désalignement et les lignes directrices portant sur l'alignement sont décrites dans l'Annexe C.
- Il est nécessaire de déterminer l'emplacement en surface d'une éprouvette d'essai au début de l'essai. L'emplacement en surface correspond à la position de la surface supérieure de l'éprouvette d'essai dans le sens vertical, lorsque la bande se déforme par le mouvement vertical de l'extrémité de charge. Cet emplacement en surface peut être déterminé par examen optique à l'aide d'un microscope optique, ou être déterminé par trois encoches successives. Lorsque l'extrémité de charge touche la bande, la légère modification de la configuration de bande peut être observée et identifiée à l'aide d'un microscope optique. La méthode détaillée en vue de la détermination de l'emplacement en surface au moyen de trois encoches successives est décrite en A.3.
- L'essai est réalisé selon une vitesse de déplacement constante jusqu'à ce que la bande se rompe. Le taux de déplacement de $L \times 10^{-4}/s$ ou $L \times 10^{-3}/s$ est recommandé, ce qui entraîne une vitesse de déformation d'approximativement $1 \times 10^{-5}/s$ ou $1 \times 10^{-4}/s$, respectivement lorsque la déformation atteint 0,5 %. Cette méthode s'applique aux matériaux insensibles à la vitesse de déformation étant donné que la vitesse de déformation varie au cours de l'essai.

6.2 Analyse de données

Pour obtenir une force réelle et des données de flèche réelles d'une éprouvette d'essai à partir des résultats expérimentaux, plusieurs compensations peuvent être exigées en fonction de l'appareillage d'essai. À titre d'exemple, les procédures d'analyse de données sont décrites à l'Annexe A pour le cas d'un appareil de nanopénétration. Ces procédures peuvent fournir des informations utiles pour d'autres types d'appareils. À partir des mesures de force et de flèche, la contrainte et la déformation peuvent être estimées par les Équations (1) et (2) suivantes. Les équations sont dérivées des hypothèses d'un effet négligeable de moment de flexion et d'une déformation uniforme sur toute l'éprouvette d'essai [1-3]. Voir la Figure 2.

$$\sigma = \frac{F}{2Bh \sin \beta}, \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{L^2 + w^2}}{L} - 1. \quad (2)$$

² Les figures entre crochet se réfèrent à la Bibliographie.

Ici, σ est la contrainte sur la bande, ε est la déformation de la bande, F est la force appliquée à une éprouvette pendant l'essai et w la flèche correspondante, β est défini par $\tan^{-1}(w/L)$. Lorsque L/h est supérieur à 300, ces équations donnent une excellente estimation du module d'élasticité et de la limite élastique vérifiés à l'Annexe C. L'effet des contraintes internes ou des contraintes résiduelles pourraient être envisagées avec cette méthode. Lorsque la contrainte interne existe, « F » dans l'équation (1) est affectée par les contraintes internes et les variations de contraintes de bande également. L'éprouvette d'essai déformée est exclue dans la présente norme.

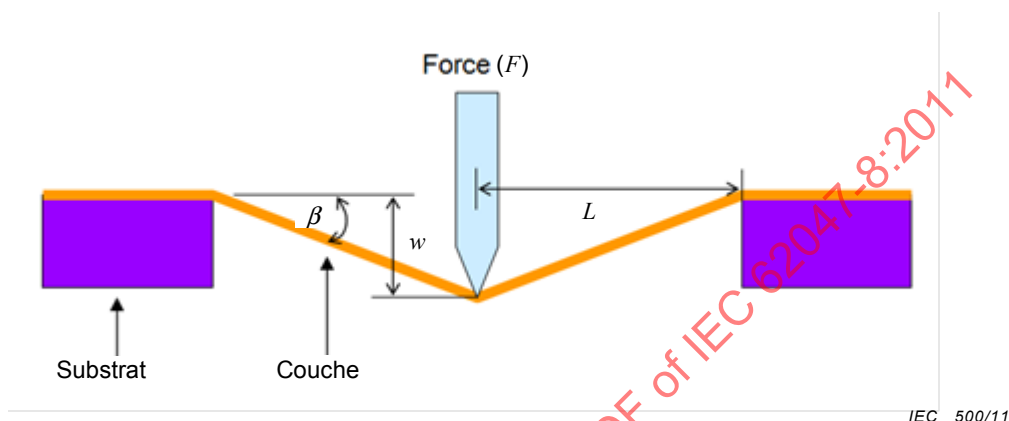


Figure 2 – Schéma d'essai de courbure de bande

7 Rapport d'essai

Le rapport d'essai doit contenir au moins les informations suivantes.

- a) référence à la présente norme internationale;
- b) numéro d'identification de l'éprouvette;
- c) procédures de fabrication de l'éprouvette;
- d) matériau de l'éprouvette d'essai;
 - dans le cas d'un monocristal: l'orientation cristallographique
 - dans le cas d'un polycristal: la texture et la grosseur de grain
- e) dimensions de l'éprouvette et méthode de mesure;
- f) description de l'appareillage d'essai;
- g) propriétés mesurées et résultats: module d'élasticité, résistance à la traction, limite élastique et courbe contrainte-déformation.

Annexe A (informative)

Analyse de données: Résultats d'essai au moyen de l'appareil de nanopénétration

A.1 Cause d'erreurs

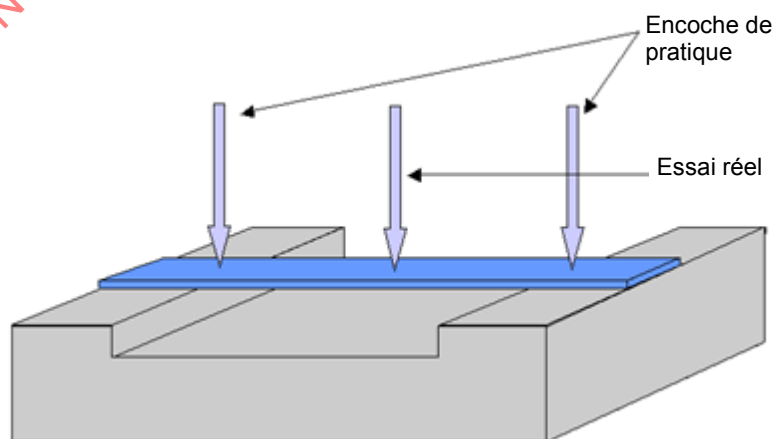
La dérive thermique, la difficulté à trouver l'emplacement en surface de l'éprouvette d'essai et la rigidité du ressort à lames de l'appareillage d'essai peuvent compromettre les résultats d'essai.

A.2 Compensation de la dérive thermique

La dérive thermique représente une cause courante d'erreur pour une mesure précise de capteur. Cette erreur est considérée comme le résultat d'une fluctuation thermique du système d'essai. Pour mesurer la dérive thermique, la flèche est consignée pour une période de temps dans des conditions de contrôle de charge alors qu'une éprouvette d'essai est en contact avec la pointe à coin. En utilisant les données de dérive, les données de flèche de l'essai de flexion de bande sont corrigées. Il s'agit d'une méthode courante de compensation d'un essai de nanopénétration. Etant donné que la déformation par fluage ne se distingue pas clairement de la dérive thermique, cette compensation n'est pas utilisée dans le cas d'une éprouvette d'essai avec un comportement au fluage.

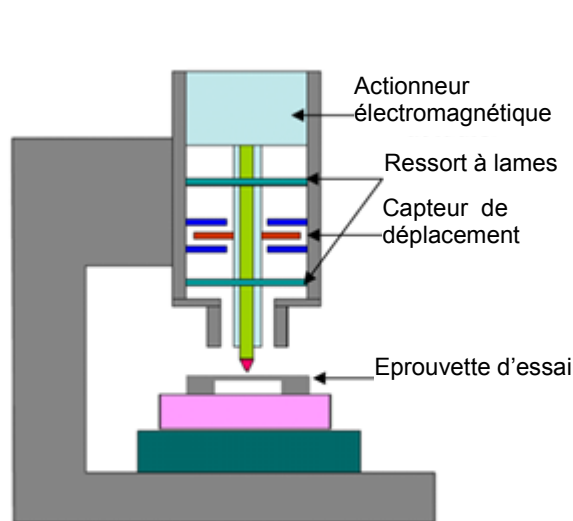
A.3 Détermination de l'emplacement en surface

Il est très difficile de trouver l'emplacement en surface d'une éprouvette d'essai sachant que la variation de rigidité est trop faible à détecter lorsque la pointe à coin est en contact avec l'éprouvette d'essai. En tant que méthode en variante, les emplacements en surface des deux extrémités de bande fixes sur le substrat sont mesurés et la valeur moyenne des emplacements en surface est prise comme l'emplacement en surface de la bande. Voir la Figure A.1. Cette méthode peut déterminer un emplacement en surface de référence même pour une couche ridée provoquée par une contrainte résiduelle en compression. La flèche d'une éprouvette d'essai est mesurée à partir de cet emplacement en surface de référence.



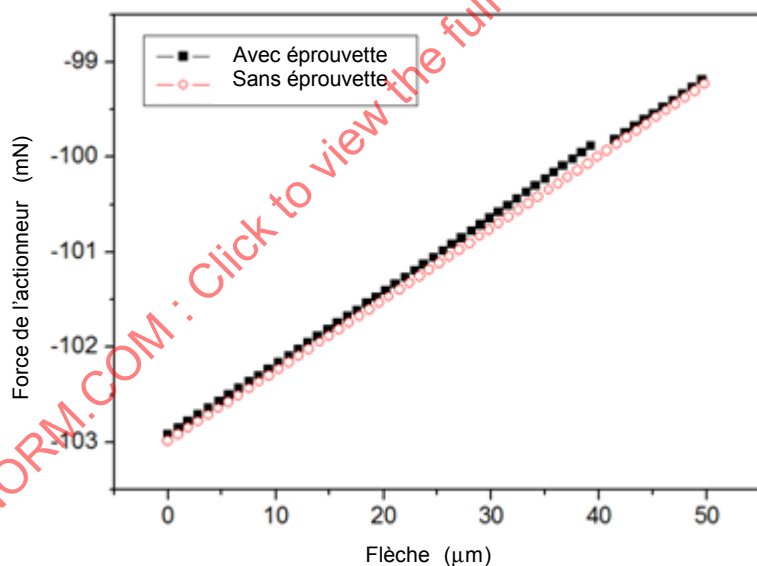
IEC 501/11

**Figure A.1 – Trois encoches successives en vue de déterminer
l'emplacement de référence d'une éprouvette**



IEC 502/11

Figure A.2 – Vue schématique d'un appareil de nanopénétration



IEC 503/11

NOTE L'éprouvette d'essai est un film d'aluminium (Au) d'une épaisseur de 0,1 μm, d'une largeur de 10 μm, et d'une longueur de 400 μm.

Figure A.3 – Courbes de force de l'actionneur par rapport à la flèche pour l'essai de courbure de bande et pour l'essai de ressort à lames

A.4 Compensation de rigidité du ressort à lames

De nombreux systèmes de nanopénétration à usage commercial utilisent un ressort à lames pour obtenir un mouvement linéaire hautement reproductible. Voir la Figure A.2. Cet appareil applique une force sur une éprouvette en contrôlant le courant électrique fourni à l'actionneur électromagnétique. La force de l'actionneur est obtenue par le courant électrique multiplié par la constante d'étalonnage de charge. La force réelle exercée sur une éprouvette peut être

déterminée par soustraction de la force pour la déformation du ressort à lames de la force de l'actionneur. La force du ressort à lames peut être mesurée en déplaçant l'actionneur sans aucune éprouvette d'essai. Ceci est représenté par la courbe en cercle ouvert de la Figure A.3. Afin de compenser la force du ressort à lames, les données de force-flèche sans éprouvette d'essai sont soustraites des données de force-flèche avec éprouvette d'essai (courbe à carrés pleins de la Figure A.3). Le signal de force réelle sur une bande peut être déterminé par cette procédure. Voir la Figure A.4. Des informations détaillées sur l'analyse de données figurent dans [3], [4] et [5].

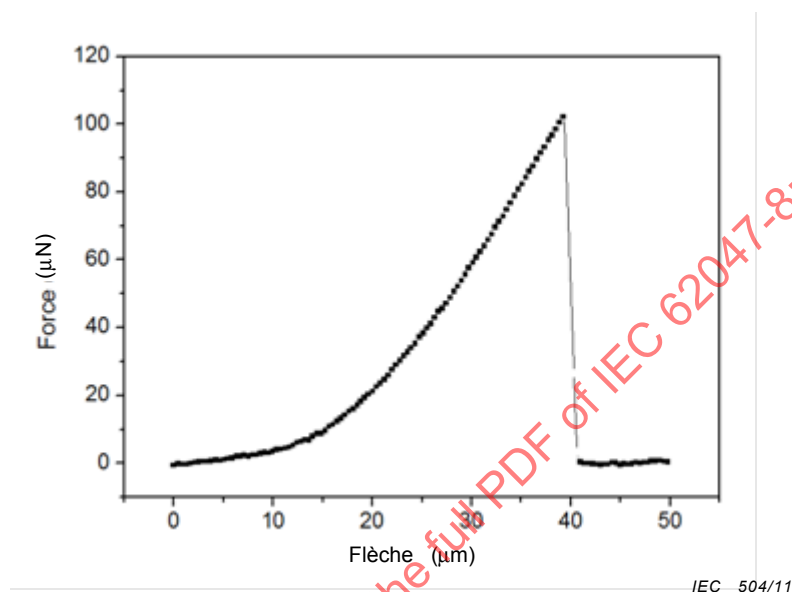


Figure A.4 – Courbe de force par rapport à la flèche d'une éprouvette après la compensation de la rigidité du ressort à lames