

# INTERNATIONAL STANDARD

## NORME INTERNATIONALE



**Semiconductor devices – Micro-electromechanical devices –  
Part 10: Micro-pillar compression test for MEMS materials**

**Dispositifs à semiconducteur – Dispositifs microélectromécaniques –  
Partie 10: Essai de compression utilisant la technique des micro-piliers pour  
les matériaux des MEMS**





## 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](mailto:inmail@iec.ch)  
Web: [www.iec.ch](http://www.iec.ch)

### About the IEC

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

### About IEC publications

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

- Catalogue of IEC publications: [www.iec.ch/searchpub](http://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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.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](http://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](http://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](http://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](mailto: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](http://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](http://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](http://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](http://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](mailto:csc@iec.ch)

Tél.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00



IEC 62047-10

Edition 1.0 2011-07

# INTERNATIONAL STANDARD

## NORME INTERNATIONALE



**Semiconductor devices – Micro-electromechanical devices –  
Part 10: Micro-pillar compression test for MEMS materials**

**Dispositifs à semiconducteur – Dispositifs microélectromécaniques –  
Partie 10: Essai de compression utilisant la technique des micro-piliers pour  
les matériaux des MEMS**

INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

COMMISSION  
ELECTROTECHNIQUE  
INTERNATIONALE

PRICE CODE  
CODE PRIX



ICS 31.080.99

ISBN 978-2-88912-606-4

## CONTENTS

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FOREWORD.....                                                                                                        | 3  |
| 1 Scope.....                                                                                                         | 5  |
| 2 Normative references .....                                                                                         | 5  |
| 3 Symbols and designations .....                                                                                     | 5  |
| 4 Test piece .....                                                                                                   | 6  |
| 4.1 General .....                                                                                                    | 6  |
| 4.2 Shape of test piece .....                                                                                        | 6  |
| 4.3 Measurement of dimensions .....                                                                                  | 6  |
| 5 Testing method and test apparatus.....                                                                             | 7  |
| 5.1 Test principle .....                                                                                             | 7  |
| 5.2 Test machine.....                                                                                                | 7  |
| 5.3 Test procedure .....                                                                                             | 8  |
| 5.4 Test environment.....                                                                                            | 8  |
| 6 Test report.....                                                                                                   | 8  |
| Annex A (informative) Error estimation using finite element method .....                                             | 10 |
| Bibliography.....                                                                                                    | 11 |
| Figure 1 – Shape of cylindrical pillar (See Table 1 for symbols) .....                                               | 5  |
| Figure 2 – Schematic of Micro-pillar compression test .....                                                          | 7  |
| Figure A.1 – Error estimation with the aspect ratio and friction coefficient in the elastic modulus measurement..... | 10 |
| Table 1 – Symbols and designations of test piece .....                                                               | 6  |

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

# SEMICONDUCTOR DEVICES – MICRO-ELECTROMECHANICAL DEVICES –

## Part 10: Micro-pillar compression test for MEMS materials

### 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 62047-10 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/85/FDIS | 47F/94/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 publication using a colour printer.**

SEMICONDUCTOR DEVICES –  
MICRO-ELECTROMECHANICAL DEVICES –

Part 10: Micro-pillar compression test for MEMS materials

1 Scope

This part of IEC 62047 specifies micro-pillar compression test method to measure compressive properties of MEMS materials with high accuracy, repeatability, and moderate effort of specimen fabrication. The uniaxial compressive stress-strain relationship of a specimen is measured, and the compressive modulus of elasticity and yield strength can be obtained.

The test piece is a cylindrical pillar fabricated on a rigid (or highly stiff) substrate by micro-machining technologies, and its aspect ratio (ratio of pillar diameter to pillar height) should be more than 3. This standard is applicable to metallic, ceramic, and polymeric materials.

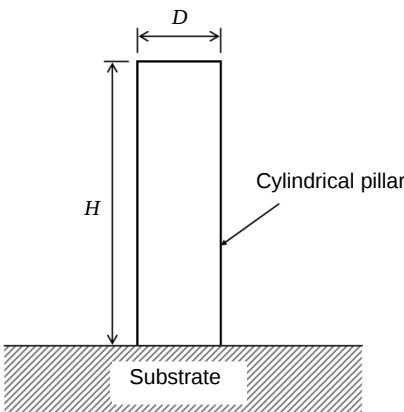
2 Normative references

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.

IEC 62047-8, *Semiconductor devices – Micro-electromechanical devices – Part 8: Strip bending test method for tensile property measurement of thin films*

3 Symbols and designations

For the purposes of this document, the shape of test piece and symbols are given in Figure 1 and Table 1, respectively. Test piece in this standard is often referred to as a pillar specimen.



IEC 1708/11

Key

Components

- cylindrical pillar: a part of micro-pillars fabricated on a substrate using micro-machining process shaped in a cylinder as a test piece
- substrate: a kind of rigid (or highly stiff) material supporting the test piece

Dimensions of cylindrical pillar

- $D$ : diameter of a test piece
- $H$ : height of a test piece

Figure 1 – Shape of cylindrical pillar (See Table 1 for symbols)

**Table 1 – Symbols and designations of test piece**

| Symbol | Unit          | Designation              |
|--------|---------------|--------------------------|
| $H$    | $\mu\text{m}$ | height of a test piece   |
| $D$    | $\mu\text{m}$ | diameter of a test piece |

## 4 Test piece

### 4.1 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 should be similar to those of the device components. There are many fabrication methods of the test piece depending on the applications.

### 4.2 Shape of test piece

This standard specifies the compressive properties of a cylindrical micro-pillar. The micro-pillars are fabricated on a substrate using micro-machining process. The shape and the verticality of the pillars should be checked using electron or optical microscopy. The boundary condition on the bottom surface of the pillar is usually regarded as the fixed boundary, and these boundary conditions are different from those of bulk scale pillars where the top and bottom surfaces are usually lubricated and regarded as the frictionless boundary. Since it is also difficult to directly measure the compressive strain of the micro-pillar during the test, the strain is estimated from the displacement of the rigid punch using the Equation (2) of 5.1. This leads to errors in strain, and consequently errors in elastic modulus and yield strength as described in Annex A. The accuracy of this method depends on the friction coefficient between the punch and the top surface, and the aspect ratio of the micro-pillar. The pillar with high aspect ratio is desirable for reducing the errors in strain estimation unless the buckling occurs. The upper limit of aspect ratio is dependent on boundary conditions and material properties of the pillar. The maximum aspect ratio is suggested as 10 [4]<sup>1</sup>. When there is no buckling after test for a pillar with an aspect ratio larger than 10, the test data should be considered as a valid one. The friction coefficient on the top surface can be reduced by applying a lubricating layer for bulk pillars (see [4]), but it is very difficult to apply the lubricating layer to micro-pillars. The maximum variation in diameter of a cross-section of a pillar should be less than 1 % of the nominal diameter. When this is not the case, the actual cross-sectional area should be measured.

### 4.3 Measurement of dimensions

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 diameter and the height of the pillar should be measured with high accuracy with less than  $\pm 1$  % error. Interferometric technique or FIB (Focused Ion Beam) sectioning can be utilized to measure the height accurately. The test piece can have a changing cross-section in the longitudinal direction and the diameter or the top surface can be different from that of the bottom surface. This dimensional error should be minimized with  $\pm 1$  % error if possible. When it is impossible, the shape of the test piece should be measured using microscopic technique and finite element analysis should be adopted to analyze the test results.

<sup>1</sup> Figure in square bracket refer to Bibliography.

5 Testing method and test apparatus

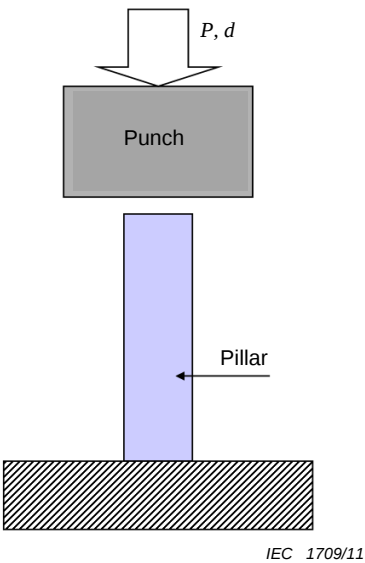
5.1 Test principle

$$\sigma = \frac{4P}{\pi D^2} \tag{1}$$

$$\varepsilon = \frac{d}{H} \tag{2}$$

where

- $\sigma$  is stress defined by an applied force divided by a cross-sectional area of the test piece;
- $d$  is a longitudinal displacement of the punch during the test;
- $\varepsilon$  is strain defined by a displacement divided by a height of the test piece.



Key

Components

Dimension of tool and supply

|         |                                                                                                                                             |     |                                                                                                            |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| punch:  | a kind of tool shaped as a disc with a large radius to reduce the error caused by misalignment between the tool and a part of micro-pillars | $P$ | specified values of compressive force                                                                      |
| pillar: | a part of micro-pillars fabricated on a substrate using micro-machining process shaped in a cylindrical pillar specimen as a test piece     | $d$ | values of longitudinal displacement of the pillar caused by applying specified values of compressive force |

Figure 2 – Schematic of micro-pillar compression test

5.2 Test machine

Depending on the dimensions and materials of the micro-pillar, the force and displacement sensors need to be carefully chosen, and their resolutions should be better than 1/1 000 of the maximum force and displacement, respectively. The actuator should have a linear motion

in the direction of the loading without any parasitic motion in the other directions, and its displacement resolution needs to be less than 1/10 of the displacement sensor resolution. Piezoelectric or voice-coil actuator is desirable for the actuator, and LDVT, capacitive, or optical sensor can be applicable to this type of test. The stiffness of the frame of the test machine should be much larger than the stiffness of the test piece. The deformation of the test machine should be checked and/or compensated, and an example for the compensation of test machine can be found in IEC 62047-8.

The punch is an important component in the testing apparatus. A flat-ended punch has been widely adopted in this type of test, and a spherical punch with a large radius can be used to reduce the error caused by misalignment between a punch and a specimen. The roughness of the surface of the punch should be better than that of the specimen. The flatness and the parallelism of the flat-ended punch should be better than 0,0002 m/m (see [4]). The radius of the spherical punch should be 100 times larger than the diameter of the test piece.

### 5.3 Test procedure

The test procedure used in this study is summarized as follows:

- a) Attach a substrate to the stage of the test apparatus. A lot of micro-pillars can be fabricated on the substrate using batch fabrication process. It is important to minimize the deviation angle between the axial direction of the pillars and the loading direction of the punch and the deviation should be less than 0,0002 m/m (see [4]).
- b) Identify the position of a test piece. The position of the test piece can be observed using an optical camera module, and the positioning error should be less than 1/10 of the diameter of the test piece.
- c) Apply a compressive displacement to the top surface of the pillar with a constant velocity of the punch. The constant velocity results in a constant strain rate. The suggested strain rate is  $5 \times 10^3$  /min (see [4]) for materials of rate-insensitive. For the materials of rate-sensitive, the effect of strain rate should be carefully investigated [3]. The maximum applied strain needs to be properly chosen depending on the materials and testing purpose. For the stress-strain curve measurement, the maximum strain range should be selected to take into account the plastic behaviour of a test piece. The suggested maximum strain range is 0,04 m/m for ductile materials and it can be less than 0,01 m/m for brittle materials.
- d) Retract the punch under the same velocity as the loading-velocity after a period of holding time. The suggested holding period is 60 s for rate-insensitive materials. The elastic modulus can be determined from the slope of the unloading curve in stress-strain data.
- e) If necessary, repeat b) and d) several times for a prescribed increment of strain to investigate the modulus change for a test piece.
- f) The measured load and displacement are converted into stress and strain using Equations (1) and (2). The elastic modulus and yield strength is determined using a procedure described in Clause 4.

### 5.4 Test environment

It is recommended to perform a test under constant temperature and humidity. Temperature change can induce thermal drift of highly sensitive sensors for force and displacement, and should be less than 2 °C. It is often necessary to check temperature change or thermal drift before and after the test. The relative humidity change during the test is suggested to be less than 2 percentage point.

## 6 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 its measurement method;
- f) Description of testing apparatus;
- g) Measured properties and results: elastic modulus, yield strength and stress-strain curve.

## Annex A (informative)

### Error estimation using finite element method

#### A.1 Sources of errors

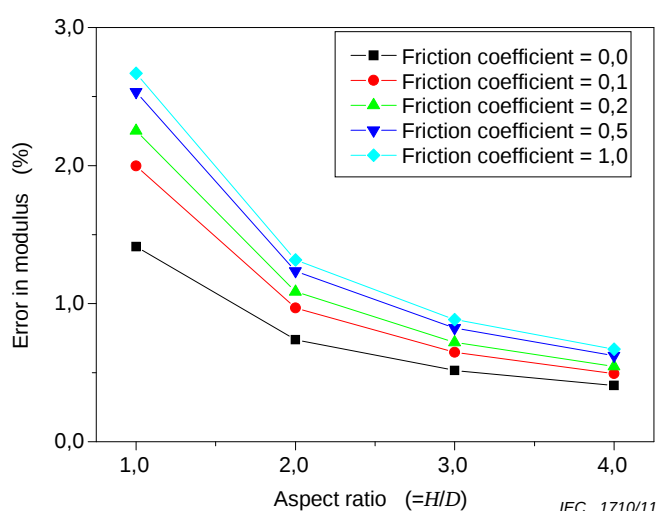
The test results can be affected by thermal drift of force and displacement sensors, misalignment, the geometry of the pillar, and the frictional contact.

#### A.2 Finite element model

The finite element analysis is performed using a commercial code, ABAQUS. The elements are a 2-dimensional, axisymmetric, and 2nd order element with reduced integration. The isotropic elasticity and incremental plasticity law based on experimentally measured stress-strain curve of SU-8 (a thermosetting polymer for photo resist) is adopted as a constitutive relation. The implicit solver with geometric nonlinearity option is utilized for the whole simulation. The fixed boundary condition is applied to the bottom surface of the pillar and the frictional contact with the punch is taken into account for the top surface of the pillar. Based on the simulation result for the convergence test, the proper finite element mesh is chosen, which yields a numerical solution with high accuracy better than 0,1 %.

#### A.3 Analysis results

The finite element analysis produces the displacement of the rigid punch and the corresponding force. The displacement and force are converted into strain and stress using the Equation (1) and (2) of 5.1, and the elastic modulus is estimated from these stress-strain data. The estimated modulus is a little different from the modulus used in finite element analysis as shown in Figure A.1. The error in elastic modulus is about 1 % for the pillar with the aspect ratio of 4. The error decreases with the decrease of the friction coefficient.



**Figure A.1 – Error estimation with the aspect ratio and friction coefficient in the elastic modulus measurement**

## Bibliography

- [1] Uchic, M.D., Dimiduk, D.M., Florando, J.N., Nix, W.D., *Sample Dimensions Influence Strength and Crystal Plasticity*, Science, Vol. 305 (2004), pp. 986-989
  - [2] Greer, J.R., Nix, W.D., *Size dependence of mechanical properties of gold at the sub-micron scale*, Appl. Phys. Vol. A80 (2005), pp. 1625-1629
  - [3] Kim, J.-H., Jeong, S.-J., Lee, H.-J., Han, S.-W., Choi, B.-I., Park, S.-H., Yang, D.-Y., *Linear analysis of the viscoelastic response of polymer micro-pillars using the open-loop flat punch indentation test*, Phil. Mag., Vol. 86(2006), pp. 5679-5690
  - [4] ASTM E9-89a: 1995, *Compression testing of metallic materials at room temperature*
-

## SOMMAIRE

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| AVANT-PROPOS .....                                                                                                               | 13 |
| 1 Domaine d'application .....                                                                                                    | 15 |
| 2 Références normatives .....                                                                                                    | 15 |
| 3 Symboles et désignations .....                                                                                                 | 15 |
| 4 Éprouvette d'essai .....                                                                                                       | 16 |
| 4.1 Généralités .....                                                                                                            | 16 |
| 4.2 Forme de l'éprouvette d'essai .....                                                                                          | 16 |
| 4.3 Mesure des dimensions .....                                                                                                  | 17 |
| 5 Méthode et appareillage d'essai .....                                                                                          | 17 |
| 5.1 Principe d'essai .....                                                                                                       | 17 |
| 5.2 Machine d'essai .....                                                                                                        | 18 |
| 5.3 Procédure d'essai .....                                                                                                      | 18 |
| 5.4 Environnement d'essai .....                                                                                                  | 19 |
| 6 Rapport d'essai .....                                                                                                          | 19 |
| Annexe A (informative) Estimation d'erreur utilisant la méthode des éléments finis .....                                         | 21 |
| Bibliographie .....                                                                                                              | 22 |
| Figure 1 – Forme du pilier cylindrique (Voir le Tableau 1 pour les symboles) .....                                               | 16 |
| Figure 2 – Schéma d'essai de compression utilisant la technique des micro-piliers .....                                          | 18 |
| Figure A.1 – Estimation d'erreur avec rapport d'aspect ratio et coefficient de friction dans la mesure du module élastique. .... | 21 |
| Tableau 1 – Symboles et désignations d'une éprouvette d'essai .....                                                              | 16 |

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

## DISPOSITIFS À SEMICONDUCTEUR – DISPOSITIFS MICROÉLECTROMÉCANIQUES –

### Partie 10: Essai de compression utilisant la technique des micro-piliers pour les matériaux des MEMS

#### 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 62047-10 a été établie par le sous-comité 47F: Systèmes microélectromécaniques, 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/85/FDIS | 47F/94/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 général *Dispositifs à semiconducteurs – Dispositifs microélectromécaniques*, 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.**

## DISPOSITIFS À SEMICONDUCTEUR – DISPOSITIFS MICROÉLECTROMÉCANIQUES –

### Partie 10: Essai de compression utilisant la technique des micro-piliers pour les matériaux des MEMS

#### 1 Domaine d'application

Cette partie de la CEI 62047 spécifie une méthode d'essai de compression utilisant la technique des micro-piliers destinée à mesurer les propriétés de compression des matériaux des MEMS<sup>1</sup> avec une précision et une répétabilité élevées et un effort modéré pour la fabrication des éprouvettes. La relation contrainte-déformation de compression uniaxiale d'une éprouvette est mesurée ce qui permet ainsi d'obtenir le module de compression et la limite d'élasticité.

L'éprouvette d'essai est un pilier cylindrique fabriqué sur un substrat rigide (ou très dur) par micro-usinage et il convient que son rapport d'aspect (rapport du diamètre du pilier sur sa hauteur) soit supérieur à 3. La présente norme est applicable aux matériaux métalliques, céramiques, et en polymères.

#### 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).

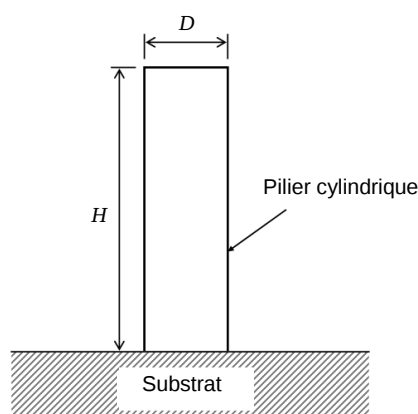
CEI 62047-8, *Dispositifs à semiconducteur – Dispositifs microélectromécaniques – Partie 8: Méthode d'essai de la flexion de bandes en vue de la mesure des propriétés de traction des couches minces*

#### 3 Symboles et désignations

Pour les besoins du présent document, la forme de l'éprouvette d'essai et les symboles utilisés sont donnés à la Figure 1 et au Tableau 1, respectivement. Dans la présente norme, l'éprouvette d'essai est souvent désignée sous le terme pilier éprouvette.

---

<sup>1</sup> MEMS = systèmes microélectromécaniques.



IEC 1708/11

## Légende

### Matériels

pilier cylindrique : une partie de micro-piliers fabriqués sur un substrat au moyen du processus de micro-usinage mis en forme dans un cylindre comme une éprouvette d'essai  
 substrat: une sorte de matériau rigide (ou très rigide) à l'appui de l'éprouvette d'essai

### Dimensions du pilier cylindrique

D: diamètre d'une éprouvette d'essai  
 H: hauteur d'une éprouvette d'essai

**Figure 1 – Forme du pilier cylindrique (Voir le Tableau 1 pour les symboles)**

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

| Symbole | Unité         | Désignation                       |
|---------|---------------|-----------------------------------|
| $H$     | $\mu\text{m}$ | hauteur d'une éprouvette d'essai  |
| $D$     | $\mu\text{m}$ | diamètre d'une éprouvette d'essai |

## 4 Eprouvette d'essai

### 4.1 Généralités

L'éprouvette d'essai doit être préparée en utilisant le même procédé de fabrication que celui utilisé pour les dispositifs qui seront réellement fabriqués. Pour minimiser l'effet lié à la taille d'une éprouvette d'essai, il convient que la structure et la taille de l'éprouvette d'essai soient similaires à celles des composants du dispositif. Il existe de nombreuses méthodes de fabrication de l'éprouvette d'essai en fonction des applications.

### 4.2 Forme de l'éprouvette d'essai

La présente norme spécifie les propriétés de compression d'un micro-pilier cylindrique. Les micro-piliers sont fabriqués sur un substrat selon un procédé de micro-usinage. Il convient que la forme et la verticalité des piliers soient vérifiées en utilisant un microscope électronique ou optique. La condition de la démarcation sur la surface inférieure du pilier est généralement considérée comme la démarcation fixe et ces conditions sont différentes de celles des piliers en volume pour lesquels les surfaces supérieure et inférieure sont généralement lubrifiées et considérées comme une démarcation sans friction. Comme il est également difficile de mesurer directement la déformation due à la compression du micro-pilier au cours de l'essai, la déformation est estimée à partir du déplacement du poinçon rigide en utilisant l'Equation (2) de 5.1. Ceci donne lieu à des erreurs concernant la déformation, et par conséquent à des erreurs dans le module et la limite d'élasticité comme décrit à l'Annexe A. La précision de cette méthode dépend du coefficient de friction entre le poinçon et la surface supérieure et du rapport d'aspect du micro-pilier. Un pilier avec un rapport d'aspect élevé est souhaitable pour réduire les erreurs d'estimation de déformation

sauf s'il se produit un affaissement. La limite supérieure du rapport d'aspect dépend des conditions de démarcation et des propriétés des matériaux du pilier. Le rapport d'aspect maximal suggéré est de 10 [4]<sup>2</sup>. En l'absence d'affaissement après l'essai pour un pilier dont le rapport d'aspect est supérieur à 10, il convient que les données d'essai soient considérées comme valables. Le coefficient de friction sur la surface supérieure peut être réduit en appliquant une couche lubrifiante pour les piliers en volume (voir [4]), mais il est très difficile d'appliquer la couche lubrifiante aux micro-piliers. Il convient que la variation maximale de diamètre d'une section d'un pilier soit inférieure à 1 % du diamètre nominal. Si tel n'est pas le cas, il convient de mesurer la section réelle.

#### 4.3 Mesure des dimensions

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. Il convient que le diamètre et la hauteur du pilier soient mesurés avec une précision élevée de moins de  $\pm 1\%$  d'erreur. La technique interférométrique ou de sectionnement FIB (*Focused Ion Beam*, faisceau d'ions focalisé) peut être utilisée pour mesurer la hauteur avec précision. L'éprouvette d'essai peut avoir une section variable dans le sens longitudinal et le diamètre ou la surface supérieure peuvent être différents par rapport à ceux de la surface inférieure. Il convient que l'erreur de dimension soit minimisée avec  $\pm 1\%$  d'erreur si possible. Lorsque cela est impossible, il convient que la forme de l'éprouvette d'essai soit mesurée avec une technique microscopique et qu'une analyse par la méthode des éléments finis soit adoptée pour analyser les résultats d'essai.

### 5 Méthode et appareillage d'essai

#### 5.1 Principe d'essai

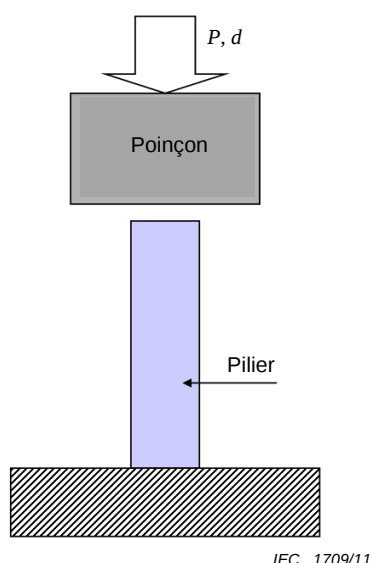
$$\sigma = \frac{4P}{\pi D^2} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{d}{H} \quad (2)$$

où

- $\sigma$  est la contrainte définie par une force appliquée, divisée par une section de l'éprouvette d'essai;
- $d$  est un déplacement longitudinal du poinçon pendant l'essai;
- $\varepsilon$  est la déformation définie par un déplacement divisé par une hauteur de l'éprouvette d'essai.

<sup>2</sup> Les chiffres entre crochet se réfèrent à la Bibliographie.



### Légende

#### Matériel

|          |                                                                                                                                                                                  |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| poinçon: | une sorte d'outil en forme de disque avec un grand rayon pour réduire l'erreur causée par un mauvais alignement entre l'outil et une partie de micro-piliers                     |
| pilier:  | une partie de micro-piliers fabriqués sur un substrat au moyen du processus de micro-usinage mis en forme dans un échantillon de pilier cylindrique comme une éprouvette d'essai |

#### Dimension de l'outil et de l'alimentation

|     |                                                                                                                           |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $P$ | valeurs spécifiées de la force de compression                                                                             |
| $d$ | valeurs de déplacement longitudinal du pilier causées par l'application des valeurs spécifiées de la force de compression |

**Figure 2 – Schéma d'essai de compression utilisant la technique des micro-piliers**

## 5.2 Machine d'essai

En fonction des dimensions et des matériaux du micro-pilier, les capteurs de force et de déplacement doivent être choisis avec soin, et il convient que leurs résolutions soient supérieures à 1/1 000 de la force maximale et du déplacement, respectivement. Il convient que l'actionneur ait un mouvement linéaire dans la direction de la sollicitation sans mouvement parasite dans les autres directions, et sa résolution de déplacement doit être inférieure à 1/10 de la résolution du capteur de déplacement. L'actionneur piézoélectrique ou à bobine acoustique est souhaitable car l'actionneur et le capteur LDVT, capacitif ou optique peuvent être applicables à ce type d'essai. Il convient que la rigidité du cadre de la machine d'essai soit bien plus importante que celle de l'éprouvette d'essai. Il convient que la déformation de la machine d'essai soit vérifiée et/ou compensée, et un exemple pour la compensation de la machine d'essai peut être trouvé dans la CEI 62047-8.

Le poinçon est un composant important de l'appareillage d'essai. Un poinçon à extrémité plate a été largement adopté dans ce type d'essai, et un poinçon sphérique avec un rayon important peut être utilisé pour réduire l'erreur causée par le mauvais alignement entre le poinçon et l'éprouvette. Il convient que la rugosité de surface du poinçon soit meilleure que celle de l'éprouvette. Il convient que la planéité et le parallélisme du poinçon à extrémité plate soient d'une qualité supérieure à 0,0002 m/m (voir [4]). Il convient que le rayon du poinçon sphérique soit 100 fois plus important que le diamètre de l'éprouvette d'essai.

## 5.3 Procédure d'essai

La procédure d'essai utilisée dans cette étude est résumée comme suit:

- a) Fixer un substrat sur la platine de l'appareillage d'essai. Un nombre important de micro-piliers peut être fabriqué sur le substrat en utilisant un processus de fabrication de lots. Il est important de minimiser l'angle de déviation entre la direction axiale des piliers et la direction de sollicitation du poinçon et il convient que la déviation soit inférieure à 0,0002 m/m (voir [4]).
- b) Identifier la position de l'éprouvette d'essai. La position de l'éprouvette d'essai peut être observée en utilisant un module de caméra optique et il convient que l'erreur de positionnement soit inférieure à 1/10 du diamètre de l'éprouvette d'essai.
- c) Appliquer un déplacement de compression à la surface supérieure du pilier avec une vitesse constante du poinçon. La vitesse constante donne lieu à une vitesse de déformation constante. La vitesse de déformation suggérée est de  $5 \times 10^3$  /min (voir [4]) pour les matériaux qui ne sont pas sensibles à la vitesse de déformation. Pour les matériaux qui sont sensibles à cette vitesse, il convient que l'effet de la vitesse de déformation soit étudié avec soin [3]. La déformation maximale appliquée doit être correctement choisie en fonction des matériaux et des essais envisagés. Pour la mesure de la courbe de contrainte déformation, il convient de choisir la plage de déformation maximale pour prendre en compte le comportement plastique d'une éprouvette d'essai. La plage de déformation maximale suggérée est de 0,04 m/m pour les matériaux ductiles et elle peut être inférieure à 0,01 m/m pour les matériaux cassants.
- d) Rétracter le poinçon avec la même vitesse que la vitesse de sollicitation après une période de maintien. La période de maintien suggérée est de 60 s pour les matériaux insensibles à la vitesse de déformation. Le module d'élasticité peut être déterminé à partir de la pente de la courbe de dé-sollicitation dans les données de contrainte déformation.
- e) Si nécessaire, répéter b) et d) plusieurs fois pour un incrément prescrit de déformation pour étudier la variation du module pour une éprouvette d'essai.
- f) La charge et le déplacement mesurés sont convertis en contrainte et déformation en utilisant les Equations (1) et (2). Le module et la limite d'élasticité sont déterminés en utilisant une procédure décrite à l'Article 4.

#### 5.4 Environnement d'essai

Il est recommandé de réaliser un essai sous une température et une humidité constantes. Une variation de la température peut induire une dérive thermique des capteurs très sensibles à la force et au déplacement, et il convient qu'elle soit inférieure à 2 °C. Il est souvent nécessaire de vérifier si une variation de température ou une dérive thermique a lieu avant et après l'essai. Il est suggéré que la variation d'humidité relative au cours de l'essai soit inférieure à 2 points de pourcentage.

### 6 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 d'essai ;
- c) Procédures de fabrication de l'éprouvette d'essai ;
- 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 d'essai et méthode de mesure ;
- f) Description de l'appareillage d'essai ;

- g) Propriétés mesurées et résultats: module d'élasticité, limite d'élasticité et courbe contrainte-déformation.

## Annexe A (informative)

### Estimation d'erreur utilisant la méthode des éléments finis

#### A.1 Sources d'erreurs

Les résultats d'essai peuvent être affectés par la dérive thermique des capteurs de force et de déplacement, le mauvais alignement, la géométrie du pilier et le contact de friction.

#### A.2 Modèle d'éléments finis

L'analyse par la méthode des éléments finis est réalisée en utilisant un code commercial, ABAQUS. Les éléments sont à 2 dimensions, axisymétriques et élément du second ordre à intégration réduite. La loi d'élasticité isotropique et de plasticité incrémentale fondée sur la courbe contrainte-déformation mesurée de manière expérimentale de SU-8 (polymère thermodurcissable pour résine photosensible) est adoptée comme une relation constitutive. La résolution implicite avec option de non-linéarité géométrique est utilisée pour toute la simulation. La condition de démarcation fixe est appliquée à la surface inférieure du piler et le contact par friction avec le poinçon est pris en compte pour la surface supérieure du pilier. À partir du résultat de la simulation pour l'essai de convergence, on choisit la maille des éléments finis qui donne une solution numérique avec une précision élevée supérieure à 0,1 %.

#### A.3 Résultats d'analyse

L'analyse par la méthode des éléments finis donne le déplacement du poinçon rigide et la force correspondante. Le déplacement et la force sont convertis en déformation et contrainte en utilisant les Equations (1) et (2) de 5.1, et le module d'élasticité est estimé à partir de ces données de contrainte déformation. Le module estimé est légèrement différent du module utilisé dans l'analyse par la méthode des éléments finis telle que représentée à la Figure A.1. L'erreur dans le module élastique est d'environ 1 % pour le pilier avec un rapport d'aspect de 4. L'erreur se réduit avec la réduction du coefficient de friction.

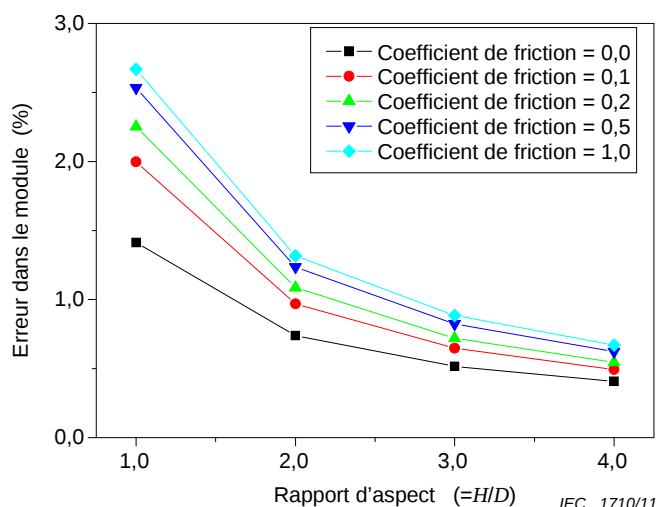


Figure A.1 – Estimation d'erreur avec rapport d'aspect ratio et coefficient de friction dans la mesure du module élastique

## Bibliographie

- [1] Uchic, M.D., Dimiduk, D.M., Florando, J.N., Nix, W.D., *Sample Dimensions Influence Strength and Crystal Plasticity*, Science, Vol. 305 (2004), pp. 986-989
  - [2] Greer, J.R., Nix, W.D., *Size dependence of mechanical properties of gold at the sub-micron scale*, Appl. Phys. Vol. A80 (2005), pp. 1625-1629
  - [3] Kim, J.-H., Jeong, S.-J., Lee, H.-J., Han, S.-W., Choi, B.-I., Park, S.-H., Yang, D.-Y., *Linear analysis of the viscoelastic response of polymer micro-pillars using the open-loop flat punch indentation test*, Phil. Mag., Vol. 86(2006), pp. 5679-5690
  - [4] ASTM E9-89a: 1995, *Compression testing of metallic materials at room temperature*
-



INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

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

Tel: + 41 22 919 02 11  
Fax: + 41 22 919 03 00  
[info@iec.ch](mailto:info@iec.ch)  
[www.iec.ch](http://www.iec.ch)