

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Semiconductor devices – Micro-electromechanical devices –
Part 16: Test methods for determining residual stresses of MEMS films – Wafer
curvature and cantilever beam deflection methods**

**Dispositifs à semiconducteurs – Dispositifs microélectromécaniques –
Partie 16: Méthodes d'essai pour déterminer les contraintes résiduelles des
films de MEMS – Méthodes de la courbure de la plaquette et de déviation de
poutre en porte-à-faux**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2015 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

The stand-alone application for consulting the entire bibliographical information on IEC International Standards, Technical Specifications, Technical Reports and other documents. Available for PC, Mac OS, Android Tablets and iPad.

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 30 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 15 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

More than 60 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

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

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

A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications IEC

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

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

Application autonome pour consulter tous les renseignements bibliographiques sur les Normes internationales, Spécifications techniques, Rapports techniques et autres documents de l'IEC. Disponible pour PC, Mac OS, tablettes Android et iPad.

Recherche de publications IEC - www.iec.ch/searchpub

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 30 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 15 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

Plus de 60 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: csc@iec.ch.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Semiconductor devices – Micro-electromechanical devices –
Part 16: Test methods for determining residual stresses of MEMS films – Wafer
curvature and cantilever beam deflection methods**

**Dispositifs à semiconducteurs – Dispositifs microélectromécaniques –
Partie 16: Méthodes d'essai pour déterminer les contraintes résiduelles des
films de MEMS – Méthodes de la courbure de la plaquette et de déviation de
poutre en porte-à-faux**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 31.080.99

ISBN 978-2-8322-2294-2

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

CONTENTS

FOREWORD	3
1 Scope	5
2 Normative references	5
3 Terms and definitions	5
4 Testing methods	6
4.1 General	6
4.2 Wafer curvature method	6
4.2.1 General	6
4.2.2 Test apparatus	7
4.2.3 Measurement procedures	7
4.2.4 Reports	7
4.3 Cantilever beam deflection method	8
4.3.1 General	8
4.3.2 Test apparatus	9
4.3.3 Measurement procedures	9
4.3.4 Reports	9
Bibliography	11
Figure 1 – Schematic drawing of compressive residual stress induced curvature after depositing thin film on substrate	6
Figure 2 – Scheme for comprehensive residual stress induced curvature	9
Table 1 – Mandatory details for the test of wafer curvature method	8
Table 2 – Mandatory details for the report of beam deflection method	10

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**SEMICONDUCTOR DEVICES –
MICRO-ELECTROMECHANICAL DEVICES –****Part 16: Test methods for determining residual stresses of MEMS films –
Wafer curvature and cantilever beam deflection methods**

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 62047-16 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/209/FDIS	47F/214/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 in the IEC 62047 series, published 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.

SEMICONDUCTOR DEVICES – MICRO-ELECTROMECHANICAL DEVICES –

Part 16: Test methods for determining residual stresses of MEMS films – Wafer curvature and cantilever beam deflection methods

1 Scope

This part of IEC 62047 specifies the test methods to measure the residual stresses of films with thickness in the range of 0,01 μm to 10 μm in MEMS structures fabricated by wafer curvature or cantilever beam deflection methods. The films should be deposited onto a substrate of known mechanical properties of Young's modulus and Poisson's ratio. These methods are used to determine the residual stresses within thin films deposited on substrate [1]¹.

2 Normative references

The following documents, in whole or in part, are normatively referenced in this document and are indispensable for its application. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 62047-21, *Semiconductor devices – Micro-electromechanical devices – Part 21: Test method for Poisson's ratio of thin film MEMS materials*

3 Terms and definitions

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

3.1

residual stress

σ_f

stress that remains after the original cause of the stresses (external forces, heat source) has been removed

3.2

curvature

κ

amount by which a geometric object deviates from being flat

Note 1 to entry: In case of a circle, $\kappa = 1/R$ where R is the radius.

3.3

body

object with mass, not only energy, that is three dimensional (extended in 3-dimensions of space), has a trajectory of position and orientation in space, and is lasting for some duration of time

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

4 Testing methods

4.1 General

The deposition of a film shall make the bi-layer structure to bend together due to residual stresses in the film. The amount of deflection is directly related to the residual stresses of the film.

There are two kinds of test methods such as wafer curvature method and cantilever beam deflection method in order to measure the residual stress.

In the case of tensile residual stress, the substrate bonded to the film becomes concave, whereas for a compressive residual stress, it becomes convex.

4.2 Wafer curvature method

4.2.1 General

Wafer curvature method should be used in a wafer level processing. A wafer should be biaxial symmetric and stress free.

Stoney [2] used a bi-layer plate system composed of a stress bearing thin film, of uniform thickness h_f , deposited on a relatively thick substrate, of uniform thickness h_s , and derived a simple Equation (1), so-called Stoney's equation, relating the curvature, κ , of the system as shown in Figure 1, to the stress, σ_f of the film as follows [3]:

$$\sigma_f = \frac{E_s h_s^2 \kappa}{6(1 - \nu_s) h_f} \quad (1)$$

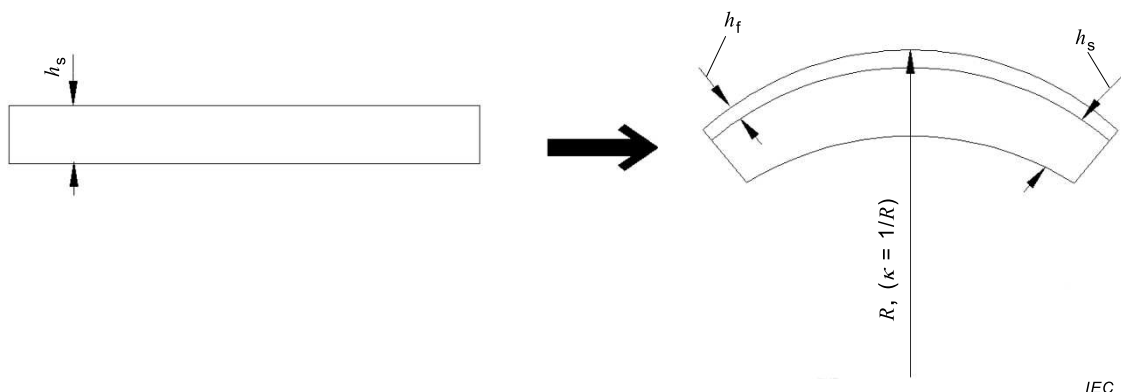
where

f and s are film and substrate, respectively;

E is the Young's modulus;

ν is Poisson's ratio (see IEC 62047-21)

The formula has been extensively used in the literature to infer film stress changes from experimental measurement of system curvature changes [4].



a) Substrate before depositing thin film

b) After depositing thin film on substrate

Figure 1 – Schematic drawing of compressive residual stress induced curvature after depositing thin film on substrate

The following assumptions should be satisfied in order to use Equation (1) [3]:

- a) both the film thickness h_f and substrate thickness h_s should be uniform and small compared with the lateral dimensions;
- b) the film shall cover the one side surface of a circular substrate;
- c) the strains and rotations of the plate system should be very small;
- d) the substrate material should be homogeneous, isotropic, and linearly elastic and the film material should be isotropic;
- e) the film stress states should be in-plane isotropic or equibiaxial (two equal stress components in any two, mutually orthogonal in-plane directions) while the out-of-plane direct stress and all shear stresses vanish;
- f) the system's curvature components are equibiaxial (two equal direct curvatures) while the twist curvature vanishes in all directions;
- g) all surviving stress and curvature components are spatially constant over the plate system's surface, a situation which is often violated in practice;
- h) the edge effect near the periphery of the substrate should be inconsequential, and all physical quantities should be invariant under a change in position.
- i) in order to measure more accurate residual stress, curvatures of before and after thin film deposition are measured and the stress of thin film is calculated by Equation (2) from the modified Equation (1):

$$\sigma_f = \frac{E_s h_s^2 \Delta\kappa}{6(1-\nu_s)h_f} \quad (2)$$

where

$\Delta\kappa$ is the difference of curvature before and after thin film deposition.

4.2.2 Test apparatus

More than one equipment or tool regarding contact methods (e.g. profilometry) or non-contact (e.g. video, laser scanning) are used for measuring curvature radius (R). Measurement accuracy is in the range of 0,1 nm to 0,1 μm which depends on measurement test apparatus.

4.2.3 Measurement procedures

The measurement procedures are as follows:

- a) measure substrate thickness (h_s) and thin film thickness (h_f);
- b) obtain the Young's modulus (E_s) of substrate and Poisson's ratio (ν_s) of substrate;
- c) measure radius of curvature (R) of system and calculate curvature (κ) or measure radii of curvature (R) and calculate the difference of curvature ($\Delta\kappa$) before and after thin film deposition of system;
- d) calculate residual stress (σ_f) according to Equation (1) or (2).

4.2.4 Reports

Calculate σ_f according to Equation (1) or (2) and write the value in Table 1.

Table 1 – Mandatory details for the test of wafer curvature method

Parameters	Values
Number of specimens	
Substrate material and thickness (h_s)	
Young's modulus of substrate (E_s)	
Poisson's ratio of substrate (ν_s)	
Film material and film thickness (h_f)	
Substrate thickness (h_s)	
Curvature radius (R) and curvature (κ) of system regarding Equation (1)	
Curvature radii (R) and calculate the difference of curvature ($\Delta\kappa$) before and after thin film deposition regarding Equation (2)	
Stress of the film (σ_f)	

4.3 Cantilever beam deflection method

4.3.1 General

Cantilever beam deflection method should be used in a piece or chip level processing. Given a small deflection compared with the beam length, the radius of curvature in case of wafer curvature method can be substituted by the length of the beam squared, L^2 , divided by twice the deflection, 2δ .

$$\sigma_f = \frac{E_s h_s^2 \kappa}{6(1-\nu_s)h_f} = \frac{E_s h_s^2}{6(1-\nu_s)h_f} \frac{\delta}{L^2/2} = \frac{E_s h_s^2 \delta}{3(1-\nu_s)h_f L^2} \quad (3)$$

Equation (3) involves the following assumption: there is no biaxial bending in thin film on beam structure. This method shall be used to determine the residual stresses of thin film materials by using a bi-layered beam structure. All the assumptions applied to the Stoney's equation of (Equation (1)) should be satisfied in this method.

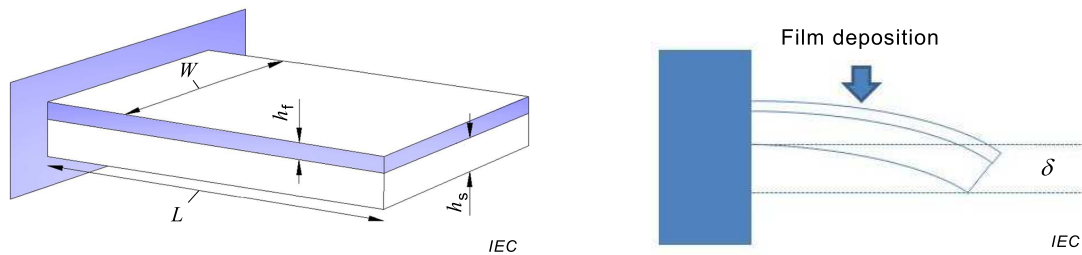
In order to measure more accurate residual stress, cantilever deflections of before and after thin film deposition of system should be measured and the stress of thin film is calculated by Equation (4) from the modified Equation (3);

$$\sigma_f = \frac{E_s h_s^2 \Delta\kappa}{6(1-\nu_s)h_f} = \frac{E_s h_s^2}{6(1-\nu_s)h_f} \frac{\Delta\delta}{L^2/2} = \frac{E_s h_s^2}{3(1-\nu_s)h_f} \frac{\Delta\delta}{L^2} \quad (4)$$

where

$\Delta\delta$ is the difference of deflection before and after thin film deposition.

Figure 2 shows scheme for comprehensive residual stress induced curvature, and Figures 2a) and 2b) show residual state of thin film and beam bending after thin film deposition. Thickness of the film h_f and the substrate h_s are provided in Figure 2a) and deflection δ induced by thin film deposition is provided in Figure 2b).



a) Residual stress free state of thin film

b) Beam bending after thin film deposition

Figure 2 – Scheme for comprehensive residual stress induced curvature

4.3.2 Test apparatus

A noncontact surface profiler (e.g. white light interferometric microscope, digital image correlation method, confocal microscope, etc.) should be used to measure the surface profiles and deflection (δ) of a film deposited on a substrate.

4.3.3 Measurement procedures

The measurement procedures are as follows:

- prepare a cantilever of free residual stress and measure the undeformed surface profiles as a reference;
- measure the thickness of a substrate (h_s) and beam length (L);
- search or measure the Young's modulus (E_s) and Poisson's ratio (ν_s) of the substrate;
- deposit a film on the corresponding substrate by using the same fabrication methods as a real MEMS device;
- measure the deformed surface profiles and the thickness of the film (h_f);
- measure the deflection (δ) of the free end of system or to measure deflections (R) and calculate the difference of deflections ($\Delta\delta$) before and after thin film deposition of system;
- calculate residual stresses (σ_f) by using Equation (3) or Equation (4).

4.3.4 Reports

Calculate σ_f according to Equation (3) or (4) and write the value in Table 2.

Table 2 – Mandatory details for the report of beam deflection method

Parameters	Values
Number of specimens	
Substrate material and thickness (h_s)	
Young's modulus of substrate (E_s)	
Poisson's ratio of substrate (ν_s)	
Film material and film thickness (h_f)	
Substrate thickness (h_s)	
Beam length (L)	
Deflection of cantilever beam (δ)	
The difference of deflections ($\Delta\delta$) before and after thin film deposition of cantilever beam	
Stress of the film (σ_f)	

Bibliography

- [1] P. J. Withers and H. K. D. H. Bhadeshia, *Overview Residual stress: Part 1 – Measurement techniques*, *Materials Science and Technology*, Vol. 17, April 2001, pp. 355-365.
 - [2] Stoney, G. G., 1909, *Tension of Metallic Films Deposited by Electrolysis*, *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 82, pp. 172–175.
 - [3] X. Feng, Y. Huang, and A. J. Rosakis, *On the Stoney Formular for a Thin Film/Substrate System With Nonuniform Substrate Thickness*, *Transactions of the ASME*, 74, Nov. 2007, pp. 1276-1281.
 - [4] Freund, L. B., and Suresh, S., 2004, *Thin Film Materials; Stress, Defect Formation and Surface Evolution*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	13
1 Domaine d'application	15
2 Références normatives	15
3 Termes et définitions	15
4 Méthodes d'essai	16
4.1 Généralités	16
4.2 Méthode de la courbure de la plaquette	16
4.2.1 Généralités	16
4.2.2 Appareil d'essai	17
4.2.3 Modes opératoires de mesure	18
4.2.4 Rapports	18
4.3 Méthode de déviation de poutre en porte-à-faux	18
4.3.1 Généralités	18
4.3.2 Appareil d'essai	19
4.3.3 Modes opératoires de mesure	19
4.3.4 Rapports	19
Bibliographie	21
Figure 1 – Dessin schématique de la courbure induite par la contrainte résiduelle de compression après dépôt de film mince sur le substrat	17
Figure 2 – Schéma représentant la courbure induite par contrainte résiduelle complète	19
Tableau 1 – Détails obligatoires pour l'essai de la méthode de la courbure de la plaquette	18
Tableau 2 – Détails obligatoires pour le rapport de la méthode de la déviation de poutre	20

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**DISPOSITIFS À SEMICONDUCTEURS –
DISPOSITIFS MICROÉLECTROMÉCANIQUES –****Partie 16: Méthodes d'essai pour déterminer
les contraintes résiduelles des films de MEMS –
Méthodes de la courbure de la plaquette
et de déviation de poutre en porte-à-faux****AVANT-PROPOS**

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale IEC 62047-16 a été établie par le sous-comité 47F: Systèmes microélectromécaniques, du comité d'études 47 de l'IEC: Dispositifs à semiconducteurs.

Le texte anglais de cette norme est issu des documents 47F/209/FDIS et 47F/214/RVD. Le rapport de vote 47F/214/RVD donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

La version française de cette norme n'a pas été soumise au vote.

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

Une liste de toutes les parties de la série IEC 62047, publiées sous le titre général *Dispositifs à semiconducteurs – Dispositifs microélectromécaniques*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

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 l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

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

DISPOSITIFS À SEMICONDUCTEURS – DISPOSITIFS MICROÉLECTROMÉCANIQUES –

Partie 16: Méthodes d'essai pour déterminer les contraintes résiduelles des films de MEMS – Méthodes de la courbure de la plaquette et de déviation de poutre en porte-à-faux

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 62047 définit les méthodes d'essai permettant de mesurer les contraintes résiduelles des films dont l'épaisseur se situe dans la plage de 0,01 μm à 10 μm dans des structures fabriquées de microsystèmes électromécaniques (MEMS) au moyen des méthodes de la courbure de la plaquette ou de déviation de poutre en porte-à-faux. Il convient de déposer les films sur un substrat dont les propriétés mécaniques de module de Young et de rapport de Poisson sont connues. Ces méthodes sont utilisées pour déterminer les contraintes résiduelles à l'intérieur des films minces déposés sur un substrat [1].¹

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 62047-21, *Dispositifs à semiconducteurs – Dispositifs microélectromécaniques – Partie 21: Méthode d'essai relative au coefficient de Poisson des matériaux MEMS en couche mince*

3 Termes et définitions

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

3.1

contrainte résiduelle

σ_f

contrainte subsistant après avoir éliminé la cause de l'origine des contraintes (forces externes, source de chaleur)

3.2

courbure

κ

importance dont un objet géométrique s'écarte d'un état plat

Note 1 à l'article: Dans le cas d'un cercle, $\kappa = 1/R$, R étant le rayon.

¹ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la Bibliographie.

3.3

corps

objet dont la masse, et non seulement l'énergie, est tridimensionnelle (s'étendant dans 3 dimensions dans l'espace), possède une trajectoire de position et une orientation dans l'espace et dure au moins un certain temps

4 Méthodes d'essai

4.1 Généralités

Le dépôt d'un film doit faire fléchir la structure bicouche, en raison des contraintes résiduelles dans le film. L'importance de la déviation est directement liée aux contraintes résiduelles du film.

Pour mesurer la contrainte résiduelle, il existe deux types de méthodes d'essai, la méthode de la courbure de la plaquette et la méthode de déviation de poutre en porte-à-faux

Dans le cas de la contrainte résiduelle de traction, le substrat collé au film devient concave, tandis que pour une contrainte résiduelle en compression, il devient convexe.

4.2 Méthode de la courbure de la plaquette

4.2.1 Généralités

Dans un traitement au niveau plaquette, il convient d'utiliser la méthode de la courbure de la plaquette. Il convient qu'une plaquette présente une symétrie biaxiale et soit exempte de contrainte.

Stoney [2] a utilisé un système de plaque bicouche constitué d'un film mince porteur de contrainte d'épaisseur uniforme h_f , déposé sur un substrat relativement épais, d'épaisseur uniforme h_s , et a déterminé une Équation simple (1), dite équation de Stoney, associant la courbure, κ , du système, comme représenté à la Figure 1, à la contrainte, σ_f , du film comme suit [3]:

$$\sigma_f = \frac{E_s h_s^2 \kappa}{6(1-\nu_s)h_f} \quad (1)$$

où

f et s représentent respectivement le film et le substrat;

E est le module de Young;

ν est le rapport de Poisson [Source IEC 62047-21].

Cette formule a été considérablement utilisée dans la littérature pour déterminer les modifications de contrainte du film d'après une mesure expérimentale des variations de courbure du système [4].

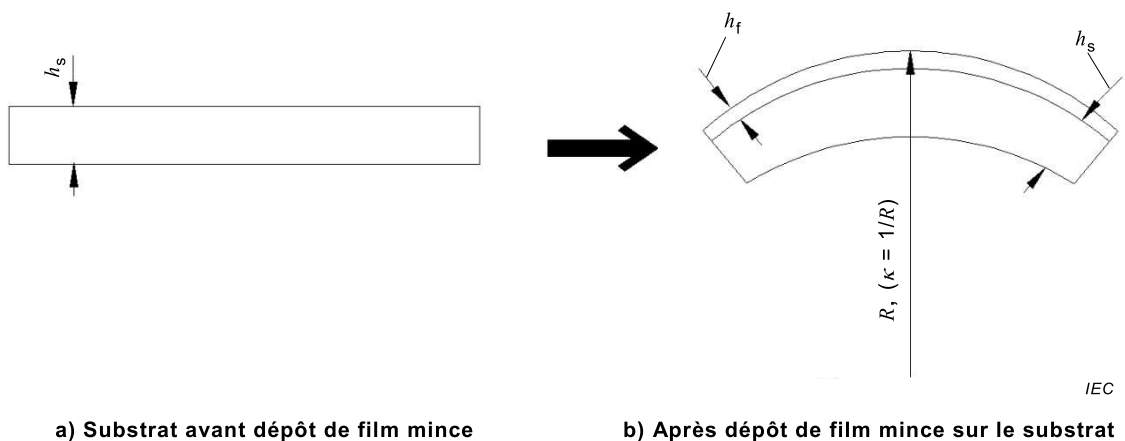


Figure 1 – Dessin schématique de la courbure induite par la contrainte résiduelle de compression après dépôt de film mince sur le substrat

Pour utiliser l'Équation (1), il convient de satisfaire aux hypothèses suivantes [3]:

- a) il convient que l'épaisseur du film h_f et l'épaisseur du substrat h_s soient toutes deux uniformes et petites par rapport aux dimensions latérales;
- b) le film doit recouvrir la surface d'un côté d'un substrat circulaire;
- c) il convient que les tensions et les rotations du système de plaque soient très faibles;
- d) il convient que le matériau du substrat soit homogène, isotrope et linéairement élastique et il convient que le matériau du film soit isotrope;
- e) il convient que les états de contrainte du film soient isotropes dans le plan ou équi-biaxiaux (deux composantes de contrainte égales dans deux directions mutuellement orthogonales quelconques dans le plan) lorsque la contrainte directe hors plan et toutes les contraintes de cisaillement diminuent;
- f) les composantes de courbure du système sont équi-biaxiales (deux courbures directes exactes) lorsque la courbure de torsion diminue dans toutes les directions;
- g) toutes les composantes de contrainte et de courbure qui subsistent sont constantes dans l'espace sur la surface du système de plaque, situation qui n'est pas souvent respectée dans la pratique;
- h) il convient que l'effet de bord près de la périphérie du substrat soit négligeable, et il convient que toutes les quantités physiques soient invariables en cas de changement de position;
- i) pour mesurer plus précisément la contrainte résiduelle, les courbures sont mesurées avant et après dépôt de film mince et la contrainte de film mince est calculée au moyen de l'Équation (2), d'après l'Équation (1) modifiée.

$$\sigma_f = \frac{E_s h_s^2 \Delta \kappa}{6(1 - \nu_s) h_f} \quad (2)$$

où

$\Delta \kappa$ est la différence de courbure avant et après dépôt de film mince.

4.2.2 Appareil d'essai

Pour mesurer le rayon de courbure (R), on utilise plusieurs appareils ou outils relatifs à des méthodes à contact (par exemple, profilométrie) ou sans contact (par exemple, balayage vidéo laser). Selon l'appareil d'essai de mesure, l'exactitude de mesure se situe dans la plage de 0,1 nm à 0,1 μ m.

4.2.3 Modes opératoires de mesure

Les modes opératoires de mesure sont les suivants:

- mesurer l'épaisseur du substrat (h_s) et l'épaisseur du film mince (h_f);
- déterminer le module de Young (E_s) et le rapport de Poisson (ν_s) du substrat;
- mesurer le rayon de courbure (R) du système et calculer la courbure (κ) ou mesurer le rayon de courbure (R) et calculer la différence de courbure ($\Delta\kappa$) du système avant et après dépôt de film mince;
- calculer la contrainte résiduelle (σ_f) selon l'Équation (1) ou (2).

4.2.4 Rapports

Calculer σ_f d'après l'Équation (1) ou (2) et inscrire la valeur dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Détails obligatoires pour l'essai de la méthode de la courbure de la plaquette

Paramètres	Valeurs
Nombre d'éprouvettes	
Matériau du substrat et épaisseur (h_s)	
Module de Young du substrat (E_s)	
Rapport de Poisson du substrat (ν_s)	
Matériau du film et épaisseur du film (h_f)	
Épaisseur du substrat (h_s)	
Rayon de courbure (R) et courbure (κ) du système selon l'Équation (1)	
Rayon de courbure (R) et calcul de la différence de courbure ($\Delta\kappa$) avant et après dépôt de film mince selon l'Équation (2)	
Contrainte du film (σ_f)	

4.3 Méthode de déviation de poutre en porte-à-faux

4.3.1 Généralités

Il convient d'utiliser la méthode de déviation de poutre en porte-à-faux dans un traitement au niveau pièce ou puce. Étant donnée une petite déviation par rapport à la longueur de la poutre, le rayon de courbure dans le cas de la méthode de la courbure de la plaquette peut être remplacé par la longueur de la poutre élevée au carré, L^2 , divisée par le double de la déviation, 2δ .

$$\sigma_f = \frac{E_s h_s^2 \kappa}{6(1-\nu_s)h_f} = \frac{E_s h_s^2}{6(1-\nu_s)h_f} \frac{\delta}{L^2/2} = \frac{E_s h_s^2 \delta}{3(1-\nu_s)h_f L^2} \quad (3)$$

L'Équation (3) implique l'hypothèse suivante: Il n'y a pas de flexion biaxiale dans le film mince sur la structure de la poutre. Cette méthode doit être utilisée pour déterminer les contraintes résiduelles des matériaux de film mince en utilisant une structure de poutre bicouche. Dans cette méthode, il convient de satisfaire à toutes les hypothèses appliquées à l'Équation (1) de Stoney.

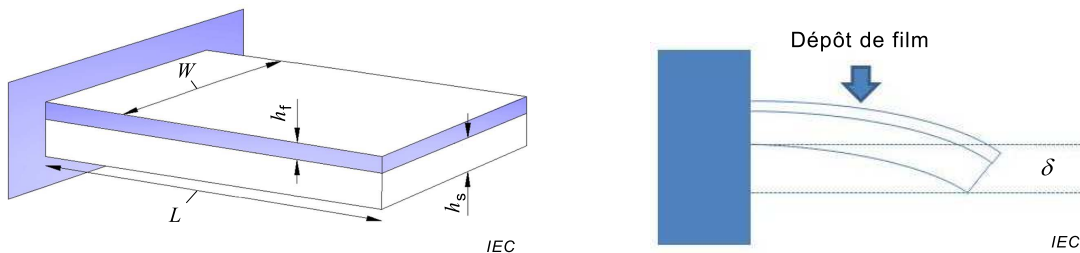
Pour mesurer plus précisément la contrainte résiduelle, il convient de mesurer les déviations de porte-à-faux avant et après dépôt de film mince et la contrainte de film mince est calculée au moyen de l'Équation (4) d'après l'Équation (3) modifiée.

$$\sigma_f = \frac{E_s h_s^2 \Delta \kappa}{6(1-\nu_s)h_f} = \frac{E_s h_s^2}{6(1-\nu_s)h_f} \frac{\Delta \delta}{L^2/2} = \frac{E_s h_s^2}{3(1-\nu_s)h_f} \frac{\Delta \delta}{L^2} \quad (4)$$

où

$\Delta \delta$ et la différence de déviation avant et après dépôt de film mince.

La Figure 2 représente le schéma de la courbure induite par contrainte résiduelle complète, et les sous-figures a) et b) de la Figure 2 représentent l'état résiduel du film mince et la flexion de la poutre après dépôt de film mince. L'épaisseur du film h_f et celle du substrat h_s sont fournies dans la sous-figure a) et la déviation δ induite par le dépôt de film mince est représentée dans la sous-figure b).



a) État du film mince sans contrainte résiduelle

b) Flexion de la poutre après dépôt de film mince

Figure 2 – Schéma représentant la courbure induite par contrainte résiduelle complète

4.3.2 Appareil d'essai

Il convient d'utiliser un profileur de surface sans contact (par exemple, un microscope interférométrique de lumière blanche, une méthode de corrélation d'image numérique, un microscope confocal, etc.), pour mesurer les profils de surface et la déviation (δ) d'un film déposé sur un substrat.

4.3.3 Modes opératoires de mesure

Les modes opératoires de mesure sont les suivants:

- préparer un porte-à-faux sans contrainte résiduelle et mesurer les profils de surface non déformés en tant que référence;
- mesurer l'épaisseur d'un substrat (h_s) et la longueur de poutre (L);
- rechercher ou mesurer le module de Young (E_s) et le rapport de Poisson (ν_s) du substrat;
- déposer un film sur le substrat correspondant en utilisant les mêmes méthodes de fabrication que celles d'un dispositif MEMS réel;
- mesurer les profils de surface déformés et l'épaisseur du film (h_f);
- mesurer la déviation (δ) de l'extrémité libre du système ou mesurer les déviations (R) et calculer la différence des déviations ($\Delta \delta$) du système avant et après dépôt de film mince;
- calculer les contraintes résiduelles (σ_f) en utilisant l'Équation (3) ou l'Équation (4).

4.3.4 Rapports

Calculer σ_f d'après l'Équation (3) ou (4) et inscrire la valeur dans le Tableau 2.

Tableau 2 – Détails obligatoires pour le rapport de la méthode de la déviation de poutre

Paramètres	Valeurs
Nombre d'éprouvettes	
Matériau du substrat et épaisseur (h_s)	
Module de Young du substrat (E_s)	
Rapport de Poisson du substrat (ν_s)	
Matériau du film et épaisseur du film (h_f)	
Épaisseur du substrat (h_s)	
Longueur de poutre (L)	
Déviations de poutre en porte-à-faux (δ)	
Différence des déviations de poutre en porte-à-faux ($\Delta\delta$) avant et après dépôt de film mince	
Contrainte du film (σ_f)	

Bibliographie

- [1] P. J. Withers and H. K. D. H. Bhadeshia, *Overview Residual stress: Part 1 – Measurement techniques*, *Materials Science and Technology*, Vol. 17, April 2001, pp. 355-365. (disponible en anglais seulement)
 - [2] Stoney, G. G., 1909, *Tension of Metallic Films Deposited by Electrolysis*, *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 82, pp. 172–175. (disponible en anglais seulement)
 - [3] X. Feng, Y. Huang, and A. J. Rosakis, *On the Stoney Formular for a Thin Film/Substrate System With Nonuniform Substrate Thickness*, *Transactions of the ASME*, 74, Nov. 2007, pp. 1276-1281. (disponible en anglais seulement)
 - [4] Freund, L. B., and Suresh, S., 2004, *Thin Film Materials; Stress, Defect Formation and Surface Evolution*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K. (disponible en anglais seulement)
-

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

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

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