

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Semiconductor devices – Micro-electromechanical devices –
Part 12: Bending fatigue testing method of thin film materials using resonant
vibration of MEMS structures**

**Dispositifs à semiconducteurs – Dispositifs microélectromécaniques –
Partie 12: Méthode d'essai de fatigue en flexion des matériaux en couche mince
utilisant les vibrations à la résonance des structures à systèmes
microélectromécaniques (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
Web: www.iec.ch

About the IEC

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

About IEC publications

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

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

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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

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

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

- Electropedia: www.electropedia.org

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

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

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

Email: csc@iec.ch
Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

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

A propos des publications CEI

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

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

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

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

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

- Electropedia: www.electropedia.org

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

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

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

Email: csc@iec.ch
Tél.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Semiconductor devices – Micro-electromechanical devices –
Part 12: Bending fatigue testing method of thin film materials using resonant
vibration of MEMS structures**

**Dispositifs à semiconducteurs – Dispositifs microélectromécaniques –
Partie 12: Méthode d'essai de fatigue en flexion des matériaux en couche mince
utilisant les vibrations à la résonance des structures à systèmes
microélectromécaniques (MEMS)**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

U

ICS 31.080.99

ISBN 978-2-88912-689-7

CONTENTS

FOREWORD.....	4
1 Scope.....	6
2 Normative references	6
3 Terms and definitions	6
4 Test equipment.....	7
4.1 General.....	7
4.2 Actuator	8
4.3 Sensor	8
4.4 Controller	8
4.5 Recorder	9
4.6 Parallel testing	9
5 Specimen	9
5.1 General.....	9
5.2 Resonant properties	9
5.3 Test part.....	9
5.4 Specimen fabrication.....	9
6 Test conditions	9
6.1 Test amplitude.....	9
6.2 Load ratio.....	10
6.3 Vibration frequency	10
6.4 Waveform.....	10
6.5 Test time	10
6.6 Test environment.....	10
7 Initial measurement	10
7.1 Reference strength measurement.....	10
7.2 Frequency response test	11
8 Test.....	11
8.1 General.....	11
8.2 Initial load application.....	11
8.3 Monitoring	12
8.4 Counting the number of cycles	12
8.5 End of the test.....	12
8.6 Recorded data.....	12
9 Test report.....	12
Annex A (informative) Example of testing using an electrostatic device with an integrated actuation component and displacement detection component.....	14
Annex B (informative) Example of testing using an external drive and a device with an integrated strain gauge for detecting displacement	17
Annex C (informative) Example of electromagnetic drive out-of-plane vibration test (external drive vibration test)	20
Annex D (informative) Theoretical expression on fatigue life of brittle materials based on Paris' law and Weibull distribution.....	23
Annex E (informative) Analysis examples.....	27
Bibliography.....	29

Figure 1 – Block diagram of the test method 7

Figure A.1 – Microscope image of the specimen 14

Figure A.2 – Block diagram of test equipment 15

Figure B.1 – The specimens’ structure 17

Figure B.2 – Block diagram of test equipment 18

Figure C.1 – Specimen for out-of-plane vibration testing 20

Figure C.2 – Block diagram of test equipment 21

Figure E.1 – Example of fatigue test results for silicon materials 27

Figure E.2 – Static strength and fatigue life of polysilicon plotted in 3D 28

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**SEMICONDUCTOR DEVICES –
MICRO-ELECTROMECHANICAL DEVICES –**

**Part 12: Bending fatigue testing method of thin film materials
using resonant vibration of MEMS structures**

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 62047-12 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/80/FDIS	47F/90/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 series, under the general title *Semiconductor devices – Microelectromechanical 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.

SEMICONDUCTOR DEVICES – MICRO-ELECTROMECHANICAL DEVICES –

Part 12: Bending fatigue testing method of thin film materials using resonant vibration of MEMS structures

1 Scope

This part of IEC 62047 specifies a method for bending fatigue testing using resonant vibration of microscale mechanical structures of MEMS (micro-electromechanical systems) and micromachines. This standard applies to vibrating structures ranging in size from 10 µm to 1 000 µm in the plane direction and from 1 µm to 100 µm in thickness, and test materials measuring under 1 mm in length, under 1 mm in width, and between 0,1 µm and 10 µm in thickness.

The main structural materials for MEMS, micromachine, etc. have special features, such as typical dimensions of a few microns, material fabrication by deposition, and test piece fabrication by means of non-mechanical machining, including photolithography. The MEMS structures often have higher fundamental resonant frequency and higher strength than macro structures. To evaluate and assure the lifetime of MEMS structures, a fatigue testing method with ultra high cycles (up to 10^{12}) loadings needs to be established. The object of the test method is to evaluate the mechanical fatigue properties of microscale materials in a short time by applying high load and high cyclic frequency bending stress using resonant vibration.

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 62047-3:2006, *Semiconductor devices – Micro-electromechanical devices – Part 3: Thin film standard test piece for tensile testing*

ISO 12107, *Metallic materials – Fatigue testing – Statistical planning and analysis of data*

3 Terms and definitions

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

3.1

amplitude

one-half the algebraic difference between the maximum value and minimum value in a loading cycle

3.2

load ratio

algebraic ratio of the maximum value and minimum value of the load of a cycle

3.3

S-N curve

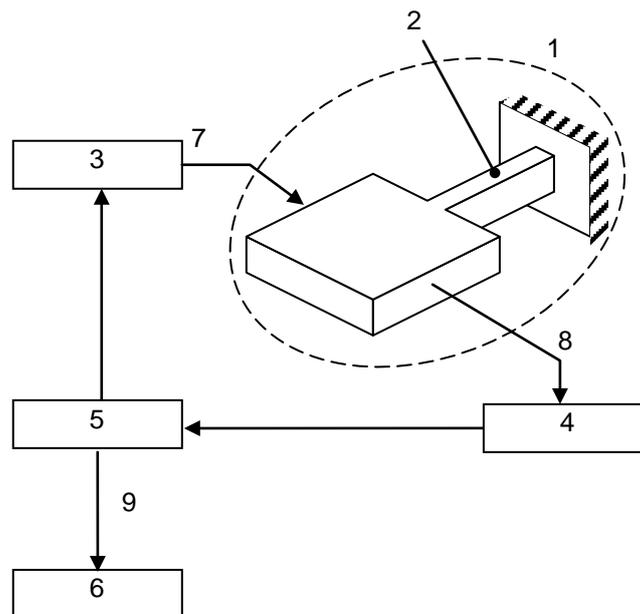
plot of stress or strain (S) against the number of cycles (N) to failure

3.4**reference strength:**

static strength or instantaneous failure strength

3.5**instantaneous failure strength**

failure strength of quasi-static test or resonant vibration test at rapid amplitude growth



IEC 2064/11

Key

- | | |
|---------------------------|--------------------------|
| 1 Specimen | 2 Test part |
| 3 Actuator | 4 Sensor |
| 5 Controller | 6 Recorder |
| 7 Force | 8 Displacement or strain |
| 9 Amplitude and frequency | |

Figure 1 – Block diagram of the test method**4 Test equipment****4.1 General**

The test equipment shall be capable of generating resonant vibration with constant amplitude and stable frequency to the test structure. A block diagram of the test equipment is shown in Figure 1. The test equipment consists of an actuator for oscillation, a sensor for amplitude detection, a controller for maintaining the resonant vibration at a constant amplitude, and a recorder for monitoring.

The amplitude control method is classified as follows.

a) Constant strain control

Applied strain in the test part is maintained at constant. It can be applied for elastic or inductile materials.

b) Constant stress control

Applied stress in the test part is maintained at constant. Load monitoring and closed loop control is crucial for the method.

4.2 Actuator

The actuator shall be capable of applying oscillation force of the necessary amplitude and frequencies along the required direction. Various kind of actuators can be used, e.g., electrostatic, piezoelectric, thermal, and electromagnetic actuators. The actuator may be installed in the test structure, as discussed in 5.1.

4.3 Sensor

The sensor shall be capable of measuring the movement of the specimen to determine the stress amplitude (for constant stress amplitude testing) or the strain amplitude (for constant strain amplitude testing) to the test part of the specimen.

The sensor and its associated electronics shall be accurate to within 1 % of the range of the stress or strain amplitude.

The sensor should measure the movement continuously, in order to maintain a constant vibration and detect failure effectively. If the specimen is an elastic material and will not show the change in the vibrating properties, however, it is permissible to measure the movement at regular time intervals.

The movement is detected by measuring displacement of the test structure or the stress or strain in the test structure. Clause A.2 shows a method for detecting rotational displacement of the mass from changes in capacitance. Clause B.2 shows a method using a strain gauge integrated in the specimen. Clause C.2 shows a method for detecting displacement of the mass using a non-contact displacement gauge.

4.4 Controller

The controller shall be capable of generating the oscillation signal to the actuator from the movement signal from the sensor, in order to maintain the required resonant vibration. During testing, the amplitude and frequency of the specimen shall be maintained at a constant level. One of the following methods should be applied for the specimen, depending on the vibration characteristics.

a) Closed loop method

The frequency and amplitude of the oscillation signal applied to the specimen shall be controlled to follow changes in the resonant frequency. In most cases, the signal applied to the actuator is generated from the movement signal of the specimen. A self-excited oscillation circuit or phase-locked loop circuit can be used as a means for maintaining the resonant frequency. An automatic gain control circuit (AGC) can also be used to maintain a constant amplitude by changing the amplitude of the oscillation signal based on the detected amplitude.

b) Open loop method

Elastic or inductile materials that show a linear response but no plastic deformation may be tested using an open loop method. This test may be performed by stopping at regular intervals and measuring the resonant characteristics, or by actuating the test structure from the start to the end of testing at a predetermined resonance frequency and oscillation signal amplitude.

The stability of the frequency and amplitude shall be maintained throughout the test to within ± 3 % of the desired value.

4.5 Recorder

The test equipment shall include a recorder for collecting the “record data” indicated in 8.6.

4.6 Parallel testing

The test may be conducted in parallel with a number of equipment units. In this case, steps should be taken to eliminate mutual electrical or mechanical interference among the equipment units.

5 Specimen

5.1 General

The specimen shall be capable of applying a constant and high-load amplitude to the test part via resonant vibration. Examples of specific structures are shown in the Clauses A.1, B.1, and C.1.

It is permissible to integrate a mechanism in the specimen for actuating or for sensing the movement of the specimen. An example of a structure integrating mechanisms for actuation and detecting amplitude is shown in Annex A.1. An example of a structure integrating a mechanism for detecting amplitude only is shown in Annex B.1.

5.2 Resonant properties

The specimen shall have resonance characteristics that enable the application of the required deformation (mode of vibration) in the specific frequency (resonance frequency) of the specimen. The resonant frequency should preferably be more than 1 000 Hz, in order to obtain a large number of the cycles in a short time. The quality factor of the specimen should be more than 100, in order to obtain a large amplitude. Steps should be taken to ensure, within this resonance frequency, that the specimen will not vibrate in a vibration mode different from that used in the test. For example, there should be no other resonant modes close to the mode used for testing.

5.3 Test part

The specimen shall have a test part in which stress sufficient to induce failure occurs. When the test is performed to evaluate the reliability of the actual device, the deformation in the test part at resonant vibration (in-plane and out-of-plane bending) shall be the same as that of the actual device. If only low stress can be applied to a structure similar to the actual device, a notch or another means may be introduced to concentrate the stress in the targeted section of the test part.

5.4 Specimen fabrication

Refer to Clause 5 of IEC 62047-3 when manufacturing the test part of the specimen. The specimen should be fabricated by the same method as the target MEMS device for reliability evaluation is fabricated. Furthermore, the same shapes, dimensions, and multilayer film structures should be used.

6 Test conditions

6.1 Test amplitude

The test amplitude should be specified from the appropriate reference strength of the specimen. The reference strength should be determined through the methods in 7.1. One of the following procedures should be chosen for determining the test amplitude during testing, based on the reference strength.

- a) Constant amplitude of 100 % of the reference strength:
to evaluate the fatigue life at a certain amplitude.
- b) Decrease the amplitude gradually from a high level:
for obtaining an S-N curve in a short time.
- c) Increase the amplitude gradually from a low level:
for obtaining an S-N curve when the number of test parts is limited.

As a reference for determining the test amplitude, example of experimental data and analysis of fatigue testing for silicon are shown in Annex D. For details on the testing of metal materials, refer to ISO 12107.

The decrease and increase step of the test amplitude for the procedures b) and c) should be selected preferably close to the standard deviation of measured reference strength.

6.2 Load ratio

The load ratio of the test method can be taken to be -1, as the quality factor (Q) of the resonant vibration is high enough (10 or more) to achieve an amplitude too high to apply by (quasi-)static testing methods.

6.3 Vibration frequency

The frequency shall be the resonant mode at which the test part is in the required stress state specified in 5.3, or a frequency close to it.

6.4 Waveform

The waveform of the displacement of the specimen and the stress and strain of the test part can be regarded as sinusoidal, irrespective of the actuating waveform

6.5 Test time

The test time shall be specified as the time at which the test ends, even if the specimen has not failed by that time. The test time can be determined as the number of the test cycles, based on the vibration frequency. For tests conducted on materials with lifetime characteristics which are frequency-independent, such as silicon, the test cycles are chosen as the stress cycles applied on the actual devices in their lifetimes. See Annex D.

6.6 Test environment

The test environment should be maintained at a constant temperature and humidity.

7 Initial measurement

7.1 Reference strength measurement

The reference strength shall be measured prior to the fatigue test. Specimens used for measurement of the reference strength should be made of the same materials, and by the same processes, as the test part to be tested. Care shall be taken when using a specimen of a different shape. If such a specimen is used, it should show the same failure mode, and the size effect on the measured strength should be considered.

The reference strength should be determined using one of the following tests.

- a) Quasi-static test

The failure strength measured by conducting quasi-static testing is set as the reference strength.

b) Instantaneous fatigue test

The maximum amplitude in the instantaneous fatigue test is set as the reference strength. In this test, the amplitude is rapidly increased up to the point of specimen failure by the same method used for the fatigue test. This method may be chosen when it is difficult to use a specimen of a different shape, or when it is difficult to apply a static load.

c) Stress analysis

The reference strength is determined using either simulation or theoretical analysis. This method can be chosen when a reference strength is difficult to determine experimentally. The amplitude at which the maximum stress in the specimen reaches the failure strength is set as the reference strength. The failure strength can be taken from published papers or other available data. The reported strength should be chosen carefully, as some materials have size effect in failure strength and environmental effects under variable temperatures, humidity levels, and so on. It is thus desirable to refer to the strength values in the literature in order to keep conditions as close as possible to those in the life test to be conducted.

Given the large variation in the strength of brittle materials such as single crystal silicon, it is preferable to obtain strength data for no less than 10 specimens when measuring the reference strength experimentally, and to adopt a statistically processed value (for example, 50 % failure stress from Weibull analysis or an arithmetical average) as the reference for stress or strain in the resonant oscillation test.

7.2 Frequency response test

The resonant properties of the specimens shall be measured prior to the fatigue test. When the resonant properties vary among specimens and the controller needs tuning, the resonant properties of all of the specimens should be measured.

The frequency response test is used to measure the resonant properties. The oscillation signal is applied from a function generator and the frequency of the signal is swept around the expected resonant properties to find the actual resonant frequency. The load applied in this response test shall be small enough to ensure that the measurements for the fatigue test are unaffected. If the effect cannot be ignored, the number of load cycles applied in this response test should preferably be added to the fatigue test data.

8 Test

8.1 General

The fatigue test shall be conducted by applying resonant oscillation at the predetermined oscillation amplitude to the specimen. The test ends when the specimen fails or the predetermined test time is reached.

8.2 Initial load application

The increasing rate of the amplitude should be specified properly at the start of the fatigue test. Because the test is conducted in resonance and the quality factor is high, the amplitude cannot reach the test amplitude without delay. If the amplitude increases too rapidly, it can result in an overshooting of the amplitude and unexpected failure at the start of the test. If, on the other hand, too much time is allowed for the increase in amplitude, the test result can be affected. The initial load applied in these procedures should be carefully controlled to ensure that measurement results of the lifetime test are unaffected. When some effect is conceivable, the procedures for increasing the amplitude should be described in the test report.

8.3 Monitoring

The vibration of the specimen shall be monitored continuously during the test to detect the specimen failure. One method for this test monitoring is to monitor the vibration frequency and/or amplitude. It is also desirable to record the changes in the vibration frequency and amplitude at proper time intervals. If the system lacks a monitoring function, the specimen may be monitored by stopping the fatigue test at certain intervals of time and conducting the frequency response test in 7.2.

8.4 Counting the number of cycles

The number of cycles of the fatigue test shall be counted using a counter. Alternatively, the cycles may be calculated by multiplying the vibration frequency by the time from the start of testing.

8.5 End of the test

The test shall end at the point of specimen failure, or when a predetermined loading time or a predetermined number of cycles has elapsed.

Specimen failure is defined as the following:

- a) fracture of the test part;
- b) a certain percentage change in the amplitude;
- c) a certain change in the oscillating frequency.

8.6 Recorded data

The failure of the specimen shall be recorded. The oscillation amplitude and frequency of the specimen and the temperature and humidity of the testing environment should be measured at certain intervals of time during the test.

9 Test report

The test report shall include the following information.

- Mandatory
 - a) reference to this International Standard, i.e. IEC 62047-12
 - b) test piece material
 - in the case of a single crystal: crystallographic orientation
 - c) method and details of test piece fabrication
 - method of thin film deposition
 - fabrication processes
 - heat treatment (annealing) conditions
 - d) shape and dimensions of test piece
 - e) test equipment
 - oscillation method (self-oscillation, external oscillation)
 - initial load application method
 - amplitude control method
 - test monitoring method (amplitude, frequency, number)

- f) fatigue test conditions
 - reference strength, and its measurement method
 - mean stress (in the case of displacement control, mean displacement)
 - stress amplitude (in the case of displacement control, displacement amplitude)
 - load ratio
 - testing environment (temperature and relative humidity)
 - wave form (sinusoidal)
 - frequency
- g) fatigue test result
 - number of samples
 - number of applied cycles to failure. If the test piece is not fractured during a predetermined number of cycles, the number of cycles and the description “no failure” should be noted.
 - definition (type) of failure
- Optional
 - a) purpose of the test
 - motivation or object
 - b) microstructure
 - in the case of polycrystalline thin film: texture and grain size
 - c) internal stress
 - d) mask design
 - resolution of mask drawing and lithography
 - e) surface roughness of test piece
 - photographs of the finished test part, along with any surface treatment (cleaning procedure)
 - f) brief description of fracture characteristics
 - g) detailed test results
 - S-N curve (S is peak stress or stress amplitude)
 - fatigue strength, statistical processing (fatigue probability)
 - amplitude history
 - fractograph.

Annex A (informative)

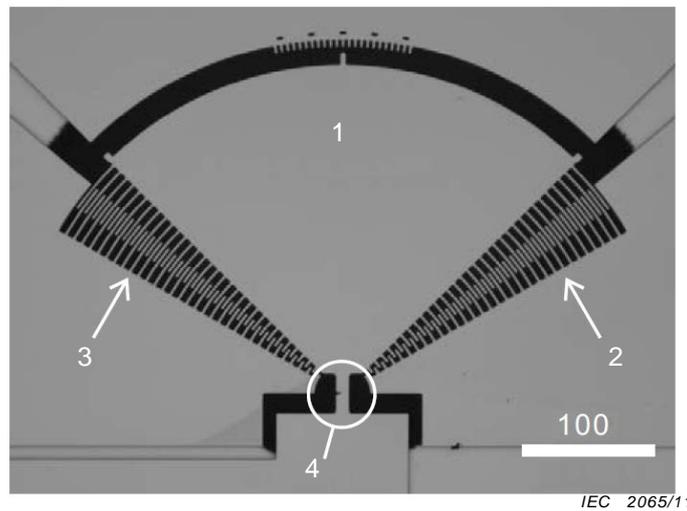
Example of testing using an electrostatic device with an integrated actuation component and displacement detection component

A.1 Specimen

The specimen consisted of a flexible beam test part and a fan-shaped mass fabricated by dry etching a thin film of single crystal silicon as shown in Figure A.1. One end of the flexible beam is fixed to the mass and the other is fixed to a substrate. An electrostatic comb-drive actuator is connected to the mass, and in-plane bending can occur in the flexible beam. A comb electrode attached to the mass outputs a signal proportional to the displacement, and the mass has a deflection scale that can be read by microscope. Since the test material is used for the electrostatic actuator and sensor, the test material is a conductive material.

The resonance frequency of the specimen is determined by the moment of inertia of the mass and the flexural rigidity of the flexible beam. The fundamental resonance frequency of the in-plane vibration of the test part varied between 38,75 kHz and 39,71 kHz. This variation resulted mainly from the less-than-uniform thickness of the thin film formed on the structure. Based on a measurement of the displacement response when an external signal was applied to the actuator, the Q value of the oscillator in the atmosphere was estimated to be 370. To increase the Q value of the oscillator, the bottom surface of the oscillator substrate was removed by etching. No resonance other than first in-plane vibration was observed in nearby frequencies. The test was performed at the resonance frequency of the in-plane vibration mode.

Dimensions in micrometres



Key

- | | |
|-------------|--------------|
| 1 Resonator | 2 Actuator |
| 3 Sensor | 4 Test piece |

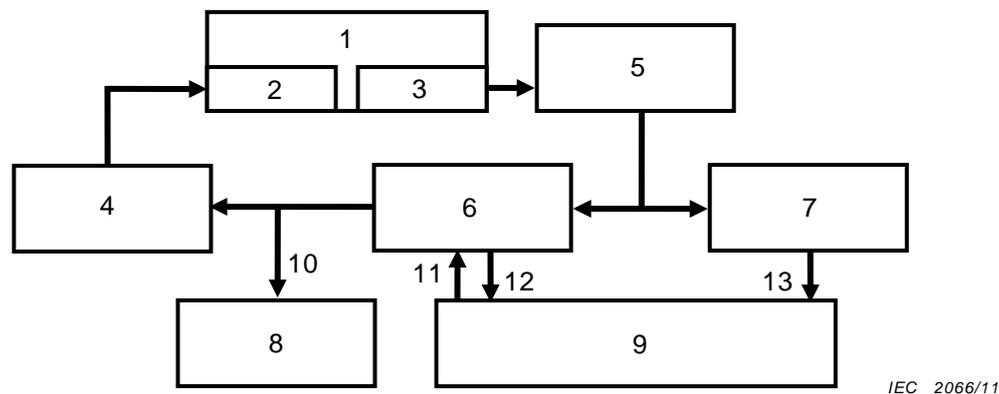
Figure A.1 – Microscope image of the specimen

The test part was composed of a single crystal silicon with an SOI active layer of 10 μm in width, 30 μm in length, and 5 μm in thickness, and etched surfaces at the sides. With in-plane bending deformation, the stress on the sidewall surfaces was a potential cause of failure. To eliminate the influence of surface roughness on the sidewall, steps were taken to obtain a

side surface as smooth as possible by lithography and etching. As it was conjectured that sufficient stress to cause failure could not be applied to test parts with a beam structure only, a notch of 4 μm deep was introduced into the middle of one side of the test part. The tip of the notch was a half circle with a radius of 0,5 μm , and the behavior of the stress concentration was evaluated by the finite element method.

A.2 Test equipment

The test equipment for applying resonant oscillation to the specimen consisted of an electric circuit only, as the actuation and detection mechanisms were built into the specimen. The block diagram of the test equipment is shown in Figure A.2. Resonant vibration was induced in the specimen by a self-oscillation method.



Key

1 Test piece	2 Actuator
3 Sensor	4 Driver
5 Oscillating circuit	6 Automatic gain controller
7 Frequency-voltage converter	8 Oscilloscope
9 Control PC	10 Oscillating waveform monitor
11 Amplitude reference	12 Amplitude output
13 Frequency output	

Figure A.2 – Block diagram of test equipment

Eight sets of test equipment were manufactured, to work in parallel. When the power supply and circuit board are shared in this type of setup, stable oscillation can be disrupted by electrical interference. Therefore, in conducting the tests in parallel, the electrical coupling was reduced by selecting specimens of slightly different frequencies.

The actuation component amplifies a drive signal whose amplitude and phase are adjusted from the displacement signal to realize feedback oscillation. The actuation signal is amplified with a biased high voltage amplifier and applied to the electrostatic comb actuator. The drive signal voltage during stable oscillation was $V_{pp} = 20 \text{ V}$ to $V_{pp} = 40 \text{ V}$.

The displacement amplitude of the specimen was measured by detecting the capacitance of the comb electrodes. The capacitance of the comb was measured with a charge amplifier, and an electrical signal proportional to the angular displacement was obtained. The amplitude was observed simultaneously by reading the deflection scale by microscope, thus enabling calibration of the electrical signal.

As the force applied to the test part is immeasurable in this technique, the stress applied to the test part is evaluated by finite element analysis based on the measured angular displacement of the mass.

With the use of the self-excited oscillation circuit, the specimen vibrates at the resonance frequency. To keep the displacement of the specimen at a constant level, an automatic gain controller (AGC) is built into the oscillation circuit. The amplitude of the specimen can be controlled by software, as the reference voltage of the AGC is controlled using the analog voltage output from a computer.

If the value set for the AGC amplitude of the vibration control circuit is raised quickly, the delay in mechanical resonance due to the high Q value can destabilize the oscillation. Unstable vibration starts after several dozen milliseconds, and a few milliseconds later the test part will fail due to vibration overshoot. To prevent this, the value set for the AGC amplitude was raised linearly over 10 s by computer control. This approach resulted in an increase in the oscillation amplitude with stable vibration, and the setting value was reached without overshoot. The time required to raise the amplitude was short in comparison with the fatigue life, and thus was excluded from the test results.

With this test method, an electric displacement signal is the output to be observed. As long as this signal is sinusoidally stable, the specimen can be presumed to be vibrating stably, without failure. When the test part fails, the signal shows a sudden break in the sinusoidal wave. The waveform of the displacement signal was observed over a short time with an oscilloscope, while the long-term displacement signal was recorded by taking the detected amplitude of the AGC at set intervals. The temperature and humidity were measured at the same time.

The measured amplitude signal and frequency signal were recorded every 1 s by an analog-digital converter circuit to determine whether or not failure had occurred. In some tests, the displacement signal at the moment of failure was recorded by a digital oscilloscope (recording was triggered by a drop in the displacement signal).

A.3 Test conditions

Because of the difficulty of performing a static or quasi-static strength test, in this test system, the reference amplitude for this specimen was determined by preliminary fatigue testing. The stress ratio was taken as -1 , since the same displacement was consistently observed at both sides in the microscope observation of the amplitude scale.

The vibration frequency was measured with a frequency-voltage convertor. Frequency changes higher than the resolution (about 200 Hz) were not observed at any point during the test. The test time was 168 h. The test was conducted with the test parts placed in a temperature- and humidity controlled chamber (temperature $23,0\text{ °C} \pm 0,1\text{ °C}$, humidity 49 % RH to 51 % RH and 24 % RH to 27 % RH).

A.4 Initial measurement

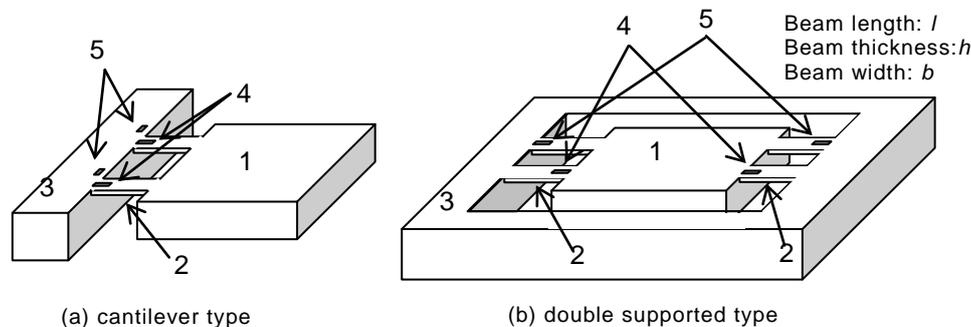
The only initial measurement was a frequency response test of the specimen. The test was performed by applying a sinusoidal signal to the actuator from an external oscillator and observing the displacement output. The resonance frequency of all specimens was inspected prior to the lifetime test. In addition, self-oscillation and stability were checked over a short time (about 1 min) with the specimens configured as a feedback circuit. The oscillation amplitudes for these initial measurements were kept below the minimum amplitude for the lifetime tests, and thus were not thought to have effects on the test results. None of the specimens that showed stable vibration failed during the initial measurement.

Annex B (informative)

Example of testing using an external drive and a device with an integrated strain gauge for detecting displacement

B.1 Specimen

The specimen is fabricated by the bulk micro-machining of a single crystal silicon wafer, as shown in Figure B.1. In this system, the mass is supported by two or four beams, displaced vertically from the substrate surface. Four strain gauges are fabricated in the beams and connected as a Wheatstone bridge. Changes of resistance due to deformation of the beams can be detected as voltage output. The displacement is monitored from the output of the strain gauge bridge. A bridge connection is formed by arranging gauges pairwise, where the strain is generated toward the opposite direction. The relationship between the displacement and bridge output is calibrated in advance.



IEC 2067/11

Key

- | | |
|------------------------------------|------------------------------------|
| 1 Resonator | 2 Test piece |
| 3 Frame | 4 Strain gauge (positive polarity) |
| 5 Strain gauge (negative polarity) | |

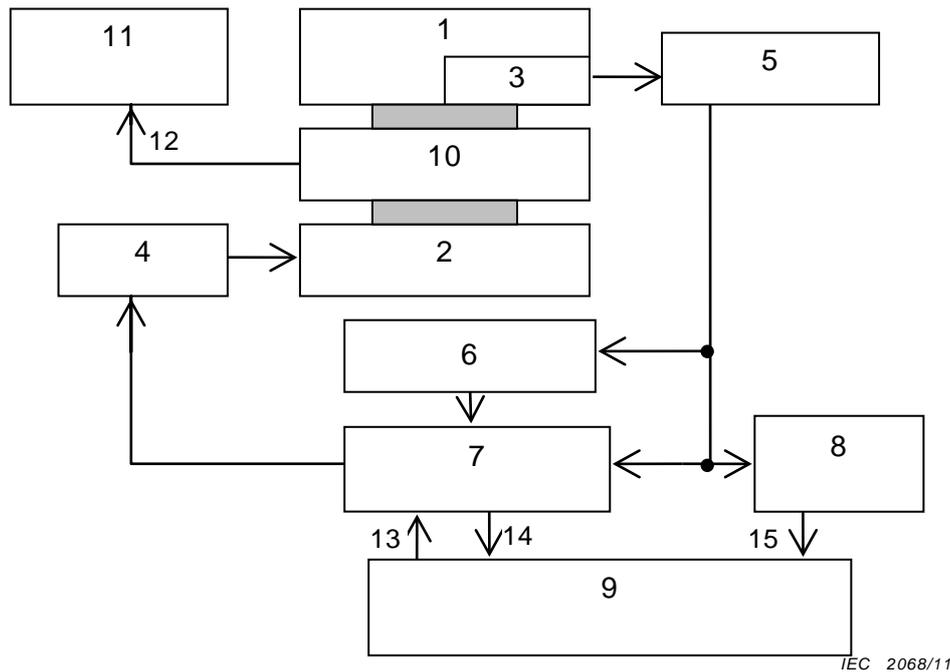
Figure B.1 – The specimens' structure

The test part is made from single crystal silicon by anisotropic wet etching. Strain gauges are formed in the surface of the specimen for detecting amplitude. The maximum stress occurring in the specimen is calibrated in advance by finite element analysis of the relationship between the maximum stress and the vertical displacement of the mass. The maximum stress can be evaluated from the voltage output of the strain gauge.

As an example, a doubly supported type single crystal silicon resonator was tested. The mass was 1 mm wide, 1,5 mm long, and 0,5 mm thick. The four suspending beams were 500 μm long, 200 μm wide, and 20 μm thick. The observed resonance frequency of the specimen was 8,5 kHz to 8,9 kHz.

B.2 Test equipment

Block diagram of the test equipment is shown in Figure B.2. The sensor is integrated with the specimen, as described in Clause B.1. A stacked piezoelectric actuator is used as the actuator. The specimen is mounted on the metal package and placed over the piezoelectric actuator. Applied acceleration to the resonator is monitored by a vibrometer.



Key

- | | |
|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 Test piece | 2 Actuator |
| 3 Sensor | 4 Driver |
| 5 Amplifier | 6 Phase locked loop circuit |
| 7 Automatic gain controller | 8 Frequency-voltage converter |
| 9 Control PC | 10 Vibrometer |
| 11 Oscilloscope | 12 Oscillating waveform monitor |
| 13 Amplitude reference | 14 Amplitude output |
| 15 Frequency output | |

Figure B.2 – Block diagram of test equipment

A driving circuit controller generates an actuating signal from the displacement signal to oscillate resonant vibration. The actuating signal is generated by a phase-locked loop (PLL) circuit. An automatic gain control circuit is used to maintain a constant amplitude set by a PC recorder. The PC was used to monitor the amplitude obtained from the control circuit and the voltage output proportional to the frequency. Eight sets of this system were operated in parallel.

Care shall be taken in fixing the specimen on the actuator, as the vibration characteristics vary significantly according to the state of bonding.

Measurements of the displacement signal and frequency-converted signal were recorded every 1 s by the computer’s analog signal input circuit, to observe whether or not failure had occurred. When the amplitude diverged by 20 % beyond the set range, it was recorded and the test part was judged to have failed.

B.3 Test conditions

The test was performed with amplitudes at 60 % to 95 % of the reference strength. The stress ratio was taken as -1.

The fatigue test was performed at resonant frequency. After encountering nonlinear vibration in some cases in the large amplitude domain, the test was also performed at frequencies slightly lower than the resonance.

The test time was 35 h (about 10^9 cycles).

The specimen was installed in a humidity-controlled clean room (temperature $23,0\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$, humidity $(50 \pm 1)\%$ RH) or a sealed container. Testing was conducted with (1) low humidity achieved with desiccant (dry air: temperature $23,0\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$, humidity $(50 \pm 1)\%$ RH), (2) N_2 gas flowing (low humidity nitrogen: temperature $23,0\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$, humidity $(50 \pm 1)\%$ RH), and (3) N_2 gas bubbled through distilled water (temperature $23,0\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$, humidity $(50 \pm 1)\%$ RH).

B.4 Initial measurement

The reference strength measurements were taken by two methods. The first was a quasi-static test in which an indenter pressed down onto the center of the mass to induce failure. The second method was performed by increasing the amplitude gradually with the test equipment and measuring the amplitude at the point of failure. Though the former was a quasi-static approach, the resonant oscillation and mode of deformation differed. The second method, meanwhile, should be considered a kind of fatigue test. The amplitude was set with the average intensity obtained from these strength tests as the standard.

In the frequency response test of the specimen, a signal was applied to the actuator from an external oscillator and measured. The resonance frequencies of all specimens were determined. In addition, self-oscillation and stability was checked over a short time (about 1 min) with the specimens configured as a feedback circuit.

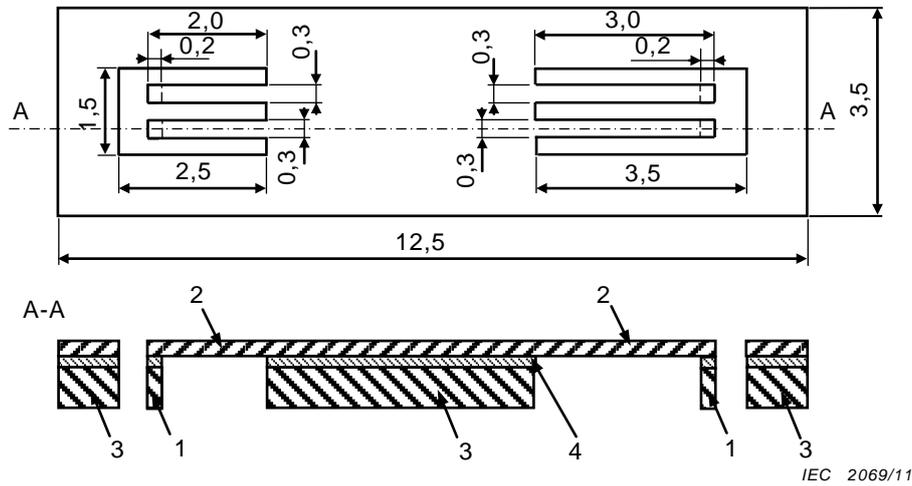
Annex C
(informative)

**Example of electromagnetic drive out-of-plane vibration test
(external drive vibration test)**

C.1 Specimen

A lifetime test for a cantilever-shaped specimen was performed using resonance generated by an external drive source such as an electromagnetic drive, then subjecting the fixed end of the specimen to cyclic loading. This approach enables fatigue life testing of cantilever-shaped components, the shapes of which are close to those of actual MEMS devices. It thus becomes advantageous to make the dimensions of the specimens close to those of the application devices. Figure C.1 shows an example of a specimen.

Dimensions in millimetres



IEC 2069/11

Key

- | | |
|----------------------------------|--|
| 1 Resonator | 2 Test piece (single crystalline silicon with thickness of 2 μm) |
| 3 Frame (single crystal silicon) | 4 Sacrificial layer (silicon dioxide) |

Figure C.1 – Specimen for out-of-plane vibration testing

The resonant frequency of the cantilever-shaped specimen is roughly estimated by Equations (C.1) and (C.2). Even so, the actual value should also be measured experimentally.

$$f_c = 0,16154 \times \frac{h}{L^2} \sqrt{\frac{E_e}{\rho}} \tag{C.1}$$

where

- f_c is the resonant frequency of the cantilever;
- h is the thickness of the test part;
- L is the length of the test part;
- E_e is the effective Young's modulus;
- ρ is the material density.

$$E_e = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (\text{C.2})$$

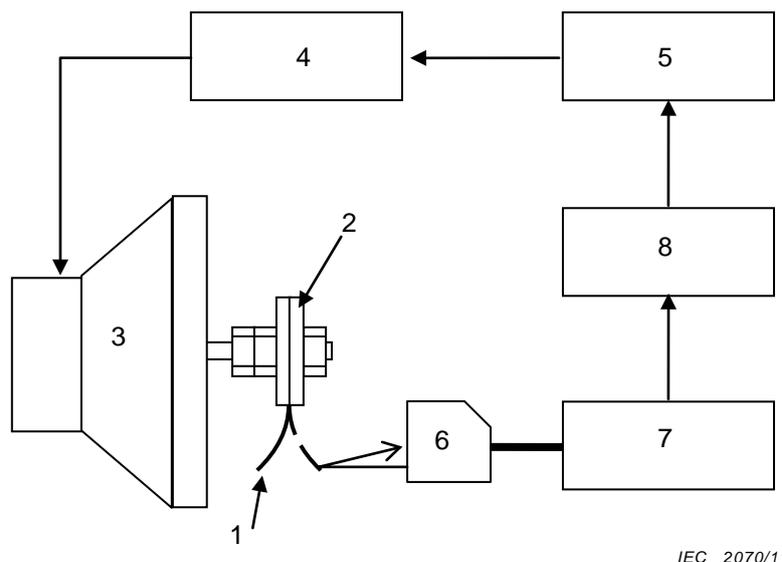
where

- E_e is the effective Young's modulus;
- E is the Young's modulus;
- ν is the Poisson's ratio.

The resonance of test part is enhanced by attaching a mass to the end of the cantilever, as shown in Figure C.1.

C.2 Test equipment

Cyclic tensile and compressive stresses were applied to the fixed end of the test part by applying the vibration at the resonant frequency through the electromagnetic driver (Figure C.2). An audio speaker and amplifier were used as an electromagnetic drive. A sinusoidal wave is suitable for the drive waveform. A non-contact displacement measurement system such as a laser displacement meter should be used to measure the cyclic displacement of the test part.



IEC 2070/11

Key

- | | |
|-----------------------------|---------------------|
| 1 Test piece | 2 Test piece holder |
| 3 Speaker (actuator) | 4 Amplifier |
| 5 Function generator | 6 Sensor head |
| 7 Laser displacement sensor | 8 Control PC |

Figure C.2 – Block diagram of test equipment

Fatigue testing is conducted by adjusting the amplitude of the resonance frequency of the specimen. Because this testing method is basically displacement-controlled, finite element analysis can be applied to determine the stress at the fixed ends, if necessary. And because the test extends over a long period of time, the system should be equipped with mechanisms for detecting test part failures and equipment to measure the testing time.

The waveform of the displacement sinusoidal wave of the electromagnetic driver can show distortion when the input power to the driver reaches excessive levels. The fatigue test should

be performed at a power below that tolerated by the driver. This is accomplished by providing a waveform monitor during testing. If the specimen does not fail at the maximum drive amplitude of the driver, a stress concentration site such as a notch may be introduced near the fixed ends of the specimen. In this case, the dimensions of the notch should be chosen properly by actual testing or finite element analysis.

C.3 Initial measurement

The initial failure displacement of the test part was measured by applying a vibration strong enough to fracture the test part immediately. The testing displacement should be chosen properly, based on the initial fracture displacement.

The resonant frequency of the test part should be measured by sweeping frequencies from low to high under an amplitude as low as possible relative to the initial failure displacement.

Annex D (informative)

Theoretical expression on fatigue life of brittle materials based on Paris' law and Weibull distribution

D.1 Stress and fatigue life relationship

The fatigue properties of brittle materials can be explained appropriately using Paris' law if defects in the material are modeled as cracks with equivalent length. By applying Paris' law, the well-known equivalent fatigue crack propagation extension theory is formulated as described below.

NOTE The effect of the load (stress) ratio on fatigue properties of silicon has not taken into account in the following analysis.

Paris' law is typically shown as follows.

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^n = C' \left(\frac{\Delta K}{K_c} \right)^n \quad (\text{D.1})$$

where

- a is the crack length;
- N is the number of cycles;
- C , C' , and n are constants;
- ΔK is the range of the stress intensity factor corresponding to stress amplitude;
- K_c is the fracture toughness.

Thus, the length of the cracks equivalent to damage are assumed to be small in comparison with the dimension of the test parts, and the stress intensity factor can be evaluated theoretically as follows.

$$K = \beta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (\text{D.2})$$

where

- K is the stress intensity factor;
- a is the crack length;
- β is the coefficient related to the crack shape;
- π is the number 3,141 592 6... .
- σ is the applied stress.

If the crack length is sufficiently small in relation to the test part, coefficient β is equivalent to that of a surface crack in a semi-infinite body, and thus can be considered constant. By simply integrating Equation (D.1), the relationship between fatigue life N and applied stress σ can be obtained by the following equation,

$$N - 1 = \frac{a_{c0}}{C'} \frac{2}{2-n} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{c0}} \right)^{-2} \left[1 - \left(\frac{\sigma}{\sigma_{c0}} \right)^{2-n} \right] \quad (D.3)$$

where

- N is the number of cycles;
- a_{c0} is the equivalent initial crack length;
- σ_{c0} is the static strength;
- C' and n are constants;
- σ is the applied stress.

If these variables are assigned to the right side of Equation (D.2), a stress intensity factor corresponding to toughness is obtained.

D.2 Fatigue lifetime distribution

If fatigue life is as shown in Equation (D.3), the variation in the fatigue life should be explicable in terms of the variation of the equivalent initial crack length. The variation in static strength is postulated as the two-parameter Weibull distribution expressed in the following equation,

$$F = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (D.4)$$

where

- F is the cumulative fracture probability;
- m is the Weibull modulus;
- σ_0 is the scale parameter;
- σ is the applied stress.

When Paris' law is applied to this distribution by substituting the stress with equivalent crack distribution assuming constant toughness, the cumulative fracture probability can be calculated as follows if stress σ is applied N cycles.

$$F = 1 - \exp \left(- \left\{ \left[a_c^{(2-n)/2} + C'(n-2)(\beta\sigma\pi^{0.5})^n (N-1) / (2K_c^n) \right]^{2/(2-n)} / a_0 \right\}^{-m/2} \right) \quad (D.5)$$

where

- F is the cumulative fracture probability;
- a_0 is the scale parameter for the Weibull distribution of the initial crack length (the equivalent crack length obtained by substituting the stress σ with the Weibull scale parameter σ_0 in Equation (D.4) into Equation (D.2));
- a_c is the equivalent crack length corresponding to failure with the stress σ ;
- β is the coefficient related to the crack shape;

- m is the Weibull modulus;
- σ is the applied stress;
- N is the number of cycles;
- C' and n are constants;
- K_c is the fracture toughness;
- π is the number 3,141 592 6... .

D.3 Effect of initial loading

For resonant vibration test, it is difficult to set the amplitude instantaneously, but the vibration amplitude gradually increases in the beginning. In this section, the effect of the initial loading procedure is evaluated.

Assuming the amplitude is linearly increased with the number of cycles,

$$\sigma = \alpha N \quad (D.6)$$

where

- σ is the applied stress;
- α is the constant showing the increasing rate;
- N is the number of cycles.

By substituting this equation and the Equation (D.2) to the Equation (D.1), and integrating the equation, the following equation representing the constant increasing amplitude test can be obtained.

$$N_f - \frac{1}{N_f^n} = \frac{a_{c0}}{C'} \frac{2(n+1)}{2-n} \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_{c0}} \right)^{-2} \left[1 - \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_{c0}} \right)^{2-n} \right] \quad (D.7)$$

where

- N_f is the number of the cycles to fracture the sample at the stress σ_f ;
- C' and n are constants;
- σ_f is the stress at fracture;
- a_{c0} is the equivalent initial crack length;
- σ_{c0} is the static strength.

By comparing the Equation (D.7) to (D.3), the following relationship was derived,

$$N_f \approx (n+1)N \quad (D.8)$$

where

- N_f is the number of the cycles to fracture the sample at the stress σ_f ;
- n is a constant;
- N is the number of cycles.

This means the number of cycles applied during the initial loading corresponds to $N_f / (n + 1)$ cycles of constant amplitude fatigue test at σ_f . Assuming the resonant frequency of 10 kHz and initial loading time 1 s, the equivalent cycles is only 500 cycles at $n = 20$.

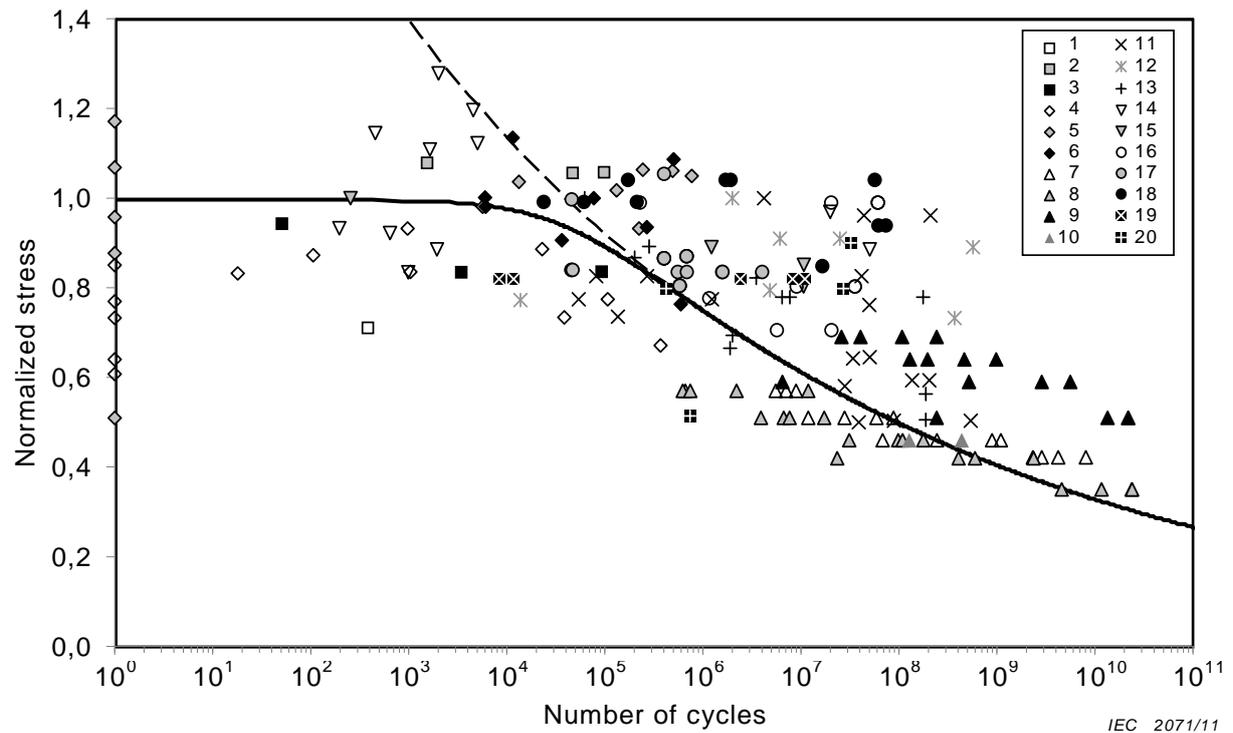
Annex E (informative)

Analysis examples

E.1 Fatigue test results of silicon

Unlike conventional macro structures, MEMS structures are fabricated from various new materials. To analyze the data from fatigue testing, it thus becomes necessary to understand the differences in fatigue behavior from those of the more familiar metallic materials. Silicon, one of the main structural materials used in MEMS, has a large deviation in both the strength and fatigue life, since silicon structures are fabricated using wet and dry etching processes.

Figure E.1 shows an S-N curve as an example of fatigue test results for silicon. The data were obtained from various organizations and plotted on a single graph. The vertical axis plots the maximum stress during the fatigue tests normalized according to the average failure stress (static strength) with a monotonically increasing load. The horizontal axis plots the number of cycles until failure.



IEC 2071/11

Key

1 Single-crystal <100> 10Hz	2 Single-crystal <110> 10Hz
3 Single-crystal <111> 10Hz	4 Single-crystal <110> 24,7-26,9°C 85-90%RH 40Hz
5 Single-crystal <110> 24,7-27,0°C 25-30%RH 40Hz	6 Single-crystal <110> 25,9-26,0°C 55-65%RH 40Hz
7 Single-crystal <110> 23 °C 25%RH 39kHz	8 Single-crystal <110> 23°C 50%RH 39kHz
9 Single-crystal <110> 23 °C 50%RH 36kHz	10 Single-crystal <110> 23°C 50%RH 39kHz
11 Single-crystal 23°C 14-31kHz	12 Single-crystal 100°C 14-31 kHz
13 Single-crystal 300°C 14-31kHz	14 Single-crystal 25°C 50-60%RH 182-196Hz
15 Single-crystal 25°C 50-60%RH 155-176Hz	16 Polycrystalline 22°C 80%RH 100Hz
17 Polycrystalline 22°C 80%RH 250Hz	18 Polycrystalline 22°C 80%RH 500Hz
19 Single-crystal ICP-RIE 22°C 80%RH 100Hz	20 Single-crystal Laser microjet 22°C 80%RH 250Hz

Figure E.1 – Example of fatigue test results for silicon materials

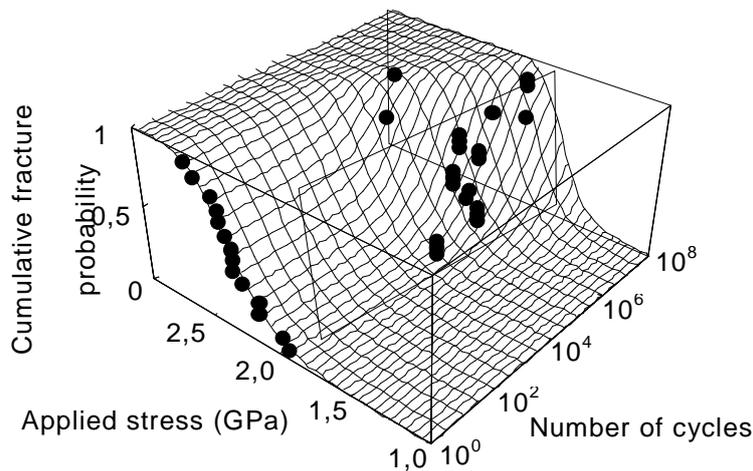
These data were obtained using different testing methods including quasi-static and dynamic loading, under various stress ratios, including fully reversed and pulsating tensile stress. In spite of such the inevitable differences in test conditions and the large scatters in test results, a common tendency can be discerned after the normalization. Unlike the case with metal materials, most of the samples failed after 10^4 cycles even during fatigue testing with stresses at around the average static strength. This is one of the important features of silicon fatigue behavior, and it can be regarded as the main factor impeding fatigue testing for silicon.

E.2 S-N curve fitting

Equation (D.3) was fitted to the whole data plotted in Figure E.1. The solid line in Figure E.1 is the S-N curve showing the results of fitting with the regression parameters a_{c0}/C' and n . The flat region of the line indicates the initial strength, which may correspond to the fact that only a small number of the fatigue failure data was observed below 10^4 cycles. This results shows that Paris' law is valid for silicon even up to the stress level around the fracture strength, where metallic materials shows general yielding. Therefore, the second term in the square brackets on the right hand side of Equation (D.3) cannot be ignored. If this term is ignored, the S-N curve becomes the dashed line which cannot describe the behavior in the region of low fatigue cycles.

E.3 Fatigue life prediction of polysilicon

Figure E.2 shows the fitted results of Equation (D.5) for a tensile fatigue test of polysilicon. Here, the constant β was calculated as 1,12. In this 3D figure, the z axis represents the cumulative fracture probability, the x axis represents the applied stress, and the y axis represents the number of cycles. The mesh of the continuous lines represents the calculated values of Equation (D.5), and the black dots are the test results. The plotted test results are ranked from the shortest to the longest equivalent initial crack length. The calculated values and test results match closely, which strongly suggests that the variation in fatigue life is closely related to the distribution of the static strength.



IEC 2072/11

Figure E.2 – Static strength and fatigue life of polysilicon plotted in 3D

Bibliography

IEC 62047-2:2006, *Semiconductor devices – Micro-electromechanical devices – Part 2: Tensile testing method for thin film materials*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	32
1 Domaine d'application	34
2 Références normatives.....	34
3 Termes et définitions	34
4 Equipements d'essai	36
4.1 Généralités.....	36
4.2 Actionneur.....	36
4.3 Capteur	36
4.4 Contrôleur	36
4.5 Enregistreur	37
4.6 Essais en parallèle	37
5 Spécimen	37
5.1 Généralités.....	37
5.2 Propriétés de la résonance.....	37
5.3 Eprouvette d'essais	38
5.4 Fabrication des spécimens	38
6 Conditions d'essai	38
6.1 Amplitude d'essai	38
6.2 Rapport de charge.....	38
6.3 Fréquence des vibrations	38
6.4 Forme d'onde	38
6.5 Temps d'essai	39
6.6 Environnement d'essai	39
7 Mesure initiale.....	39
7.1 Mesure de la résistance de référence.....	39
7.2 Essai de réponse en fréquence	40
8 Essai.....	40
8.1 Généralités.....	40
8.2 Application de la charge initiale	40
8.3 Surveillance	40
8.4 Comptage du nombre de cycles	40
8.5 Fin de l'essai	40
8.6 Données enregistrées	41
9 Rapport d'essai	41
Annexe A (informative) Exemple d'essai utilisant un dispositif électrostatique avec un composant d'actionnement intégré et un composant de détection de déplacement.....	43
Annexe B (informative) Exemple d'essai utilisant une excitation externe et un dispositif avec jauge de déformation intégrée pour détecter un déplacement	47
Annexe C (informative) Exemple d'essai aux vibrations par excitation électromagnétique hors plan (essai aux vibrations d'excitation externe).....	50
Annexe D (informative) Expression théorique de la durée de vie en fatigue des matériaux fragiles basée sur la loi de Paris et la distribution de Weibull.....	53
Annexe E (informative) Exemples d'analyse.....	57
Bibliographie.....	59

Figure 1 – Schéma fonctionnel de la méthode d'essai	35
Figure A.1 – Image du spécimen au microscope	43
Figure A.2 – Schéma fonctionnel de l'équipement d'essai	44
Figure B.1 – Structure du spécimen	47
Figure B.2 – Schéma fonctionnel de l'équipement d'essai	48
Figure C.1 – Spécimen pour essai aux vibrations hors plan	50
Figure C.2 – Schéma fonctionnel de l'équipement d'essai	51
Figure E.1 – Exemple de résultats d'essai de fatigue pour les matériaux en silicium	57
Figure E.2 – Tracé en 3D de la durée de vie en fatigue et de la résistance statique du polysilicium	58

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

DISPOSITIFS À SEMICONDUCTEURS – DISPOSITIFS MICROÉLECTROMÉCANIQUES –

Partie 12: Méthode d'essai de fatigue en flexion des matériaux en couche mince utilisant les vibrations à la résonance des structures à systèmes microélectromécaniques (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 62047-12 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/80/FDIS	47F/90/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 série CEI 62047, présentées 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.

DISPOSITIFS À SEMICONDUCTEURS – DISPOSITIFS MICROÉLECTROMÉCANIQUES –

Partie 12: Méthode d'essai de fatigue en flexion des matériaux en couche mince utilisant les vibrations à la résonance des structures à systèmes microélectromécaniques (MEMS)

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 62047 spécifie une méthode d'essai de fatigue en flexion utilisant les vibrations à la résonance des structures mécaniques à très petite échelle des systèmes microélectromécaniques (MEMS)¹, et des micromachines. La présente norme s'applique aux structures vibrantes dont la taille est dans la gamme allant de 10 µm à 1 000 µm dans le plan et de 1 µm à 100 µm d'épaisseur, ainsi qu'à des matériaux d'essai mesurant moins de 1 mm de longueur, moins de 1 mm de largeur et entre 0,1 µm et 10 µm d'épaisseur.

Les matériaux de construction principaux pour les systèmes microélectromécaniques, les micromachines, etc., comportent des caractéristiques spéciales telles que des dimensions typiques de l'ordre de quelques microns, la fabrication des matériaux par dépôt et la fabrication d'éprouvettes d'essai par usinage non mécanique, par exemple la photolithographie. Les structures à systèmes micro-électromécaniques présentent souvent une fréquence de résonance fondamentale et une résistance supérieures à celles des macro-structures. Pour évaluer et garantir la durée de vie des structures à systèmes microélectromécaniques, on doit établir une méthode d'essai de fatigue avec des cycles de charge très élevés (jusqu'à 10^{12}). Le but de la méthode d'essai est d'évaluer les propriétés de fatigue mécanique des matériaux à très petite échelle sur une courte durée en appliquant une contrainte de flexion à charge élevée et à haute fréquence cyclique en utilisant des vibrations à la résonance.

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 62047-3:2006, *Dispositifs à semiconducteurs – Dispositifs microélectromécaniques – Partie 3: Epreuve d'essai normalisée en couche mince pour l'essai de traction*

ISO 12107, *Matériaux métalliques – Essais de fatigue – Programmation et analyse statistique de données*

3 Termes et définitions

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

¹ MEMS = *micro-electromechanical systems* en anglais.

3.1**amplitude**

la moitié de la différence algébrique entre la valeur maximale et la valeur minimale dans un cycle de charge

3.2**rapport de charge**

rapport algébrique entre la valeur maximale et la valeur minimale de la charge d'un cycle

3.3**courbe S-N**

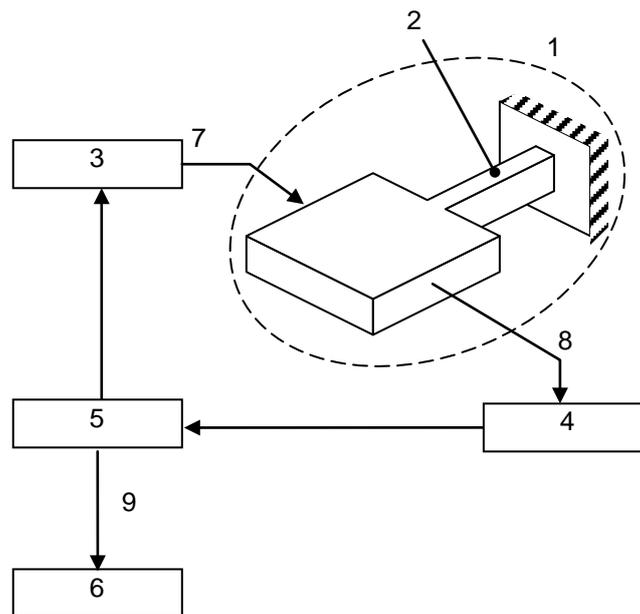
tracé de la contrainte ou de la déformation (S) en fonction du nombre de cycle (N) avant défaillance

3.4**résistance de référence**

résistance statique ou résistance à une défaillance instantanée

3.5**résistance à une défaillance instantanée**

résistance à une défaillance d'un essai quasi-statique ou d'un essai aux vibrations à la résonance pour une augmentation rapide de l'amplitude



IEC 2064/11

Légende

- | | | | |
|---|------------------------|---|----------------------------|
| 1 | Spécimen | 2 | Eprouvette d'essais |
| 3 | Actionneur | 4 | Capteur |
| 5 | Contrôleur | 6 | Enregistreur |
| 7 | Force | 8 | Déplacement ou déformation |
| 9 | Amplitude et fréquence | | |

Figure 1 – Schéma fonctionnel de la méthode d'essai

4 Equipements d'essai

4.1 Généralités

Les équipements d'essai doivent être capables de délivrer à la structure d'essai des vibrations à la résonance d'amplitude constante et de fréquence stable. Un schéma fonctionnel de l'équipement d'essai est représenté à la Figure 1. Les équipements d'essai comprennent un actionneur délivrant les oscillations, un capteur pour détecter l'amplitude, un contrôleur pour maintenir les vibrations à la résonance à une amplitude constante et un enregistreur pour contrôler.

La méthode de contrôle de l'amplitude est classée comme suit.

a) Contrôle de déformation constante

La déformation appliquée à l'éprouvette d'essai est maintenue constante. Elle peut être appliquée aux matériaux élastiques ou inductiles.

b) Contrôle de contrainte constante

La contrainte appliquée à l'éprouvette d'essai est maintenue constante. La surveillance de la charge et un contrôle en boucle fermée sont impératifs dans cette méthode.

4.2 Actionneur

L'actionneur doit être capable d'appliquer une force d'oscillation ayant l'amplitude et les fréquences nécessaires dans la direction requise. Différents types d'actionneurs peuvent être utilisés, par exemple des actionneurs électrostatiques, piézoélectriques, thermiques et électromagnétiques. L'actionneur peut être installé dans la structure d'essai, comme cela est présenté en 5.1.

4.3 Capteur

Le capteur doit être capable de mesurer le mouvement du spécimen pour déterminer l'amplitude de la contrainte (pour les essais à amplitude de contrainte constante) ou l'amplitude de la déformation (pour les essais à amplitude de déformation constante) sur l'éprouvette d'essai du spécimen.

La précision du capteur et de ses composants électroniques doit être inférieure à 1 % de la gamme d'amplitude de contrainte ou de déformation.

Il convient que le capteur mesure le mouvement en permanence pour maintenir des vibrations constantes et détecter efficacement une défaillance. Si le spécimen est un matériau élastique qui ne modifie pas les propriétés des vibrations, il est admissible de mesurer le mouvement à des intervalles de temps réguliers.

Le mouvement est détecté en mesurant le déplacement de la structure d'essai ou la contrainte ou la déformation dans la structure d'essai. L'Article A.2 présente une méthode pour détecter un déplacement rotationnel de la masse à partir des variations de capacité. L'Article B.2 présente une méthode utilisant une jauge de déformation intégrée au spécimen. L'Article C.2 présente une méthode pour détecter un déplacement de la masse en utilisant une jauge de déplacement sans contact.

4.4 Contrôleur

Le contrôleur doit être capable de délivrer le signal d'oscillation à l'actionneur à partir du signal de mouvement provenant du capteur, afin de maintenir les vibrations à la résonance requises. Pendant les essais, l'amplitude et la fréquence du spécimen doivent être maintenues à un niveau constant. Il convient d'appliquer une des méthodes suivantes au spécimen, en fonction des caractéristiques des vibrations.

a) Méthode en boucle fermée

La fréquence et l'amplitude du signal d'oscillation appliqué au spécimen doivent être contrôlées pour suivre les variations de la fréquence de résonance. Dans la plupart des cas, le signal appliqué à l'actionneur est généré à partir du signal de mouvement du spécimen. Un circuit d'oscillation à auto-excitation ou un circuit à boucle à verrouillage de phase peut être utilisé pour maintenir la fréquence de résonance. Un circuit de commande automatique de gain (CAG) peut également être utilisé pour maintenir une amplitude constante en changeant l'amplitude du signal d'oscillation basée sur l'amplitude détectée.

b) Méthode en boucle ouverte

Les matériaux élastiques ou inductiles qui présentent une réponse linéaire mais pas de déformation plastique peuvent être soumis à des essais en utilisant une méthode en boucle ouverte. Cet essai peut être réalisé en arrêtant le processus à intervalles réguliers et en mesurant les caractéristiques de la résonance ou en actionnant la structure d'essai du début à la fin de l'essai à une amplitude du signal d'oscillation et une fréquence de résonance prédéterminées.

La stabilité de la fréquence et la stabilité de l'amplitude doivent être maintenues pendant tout l'essai à $\pm 3\%$ de la valeur souhaitée.

4.5 Enregistreur

Les équipements d'essai doivent inclure un enregistreur pour collecter les "données enregistrées" indiquées en 8.6.

4.6 Essais en parallèle

L'essai peut être réalisé en parallèle avec un certain nombre d'équipements. Dans ce cas, il convient de prendre des mesures pour éliminer les interférences mécaniques ou électriques entre les équipements.

5 Spécimen

5.1 Généralités

Le spécimen doit être capable de délivrer à l'éprouvette d'essai une amplitude à charge élevée et constante via des vibrations à la résonance. Des exemples de structures spécifiques sont représentés dans les Articles A.1, B.1, et C.1.

Il est admissible d'intégrer un mécanisme dans le spécimen pour actionner ou pour détecter le mouvement du spécimen. Un exemple de structure intégrant des mécanismes pour actionner et détecter l'amplitude est présenté à l'Annexe A.1. Un exemple de structure intégrant un mécanisme pour détecter l'amplitude seulement est présenté à l'Annexe B.1.

5.2 Propriétés de la résonance

Le spécimen doit avoir des caractéristiques de résonance qui permettent l'application de la déformation requise (mode de vibrations) à la fréquence spécifique (fréquence de résonance) du spécimen. Il convient que la fréquence de résonance soit de préférence supérieure à 1 000 Hz pour obtenir un grand nombre de cycles sur une courte période. Il convient que le facteur de qualité du spécimen soit supérieur à 100 pour obtenir une grande amplitude. Il convient de prendre des mesures pour garantir, à la fréquence de résonance, que le spécimen ne vibrera pas dans un mode de vibration différent de celui utilisé pour l'essai. Par exemple, il convient qu'il n'y ait pas d'autre mode de résonance proche du mode utilisé pour l'essai.

5.3 Epreuve d'essais

Le spécimen doit avoir une éprouvette d'essai dans laquelle apparaît une contrainte suffisante pour provoquer une défaillance. Lorsque l'essai est réalisé pour évaluer la fiabilité du dispositif réel, la déformation de l'éprouvette d'essai aux vibrations à la résonance (flexion dans le plan et hors du plan) doit être la même que celle du dispositif réel. Si seule une faible contrainte peut être appliquée à une structure similaire au dispositif réel, une encoche ou un autre moyen peut être introduit pour concentrer la contrainte dans la section visée de l'éprouvette d'essai.

5.4 Fabrication des spécimens

Se reporter à l'Article 5 de la CEI 62047-3 pour fabriquer l'éprouvette d'essai du spécimen. Il convient de construire les spécimens en suivant la méthode de fabrication du dispositif à systèmes microélectromécaniques pour évaluer la fiabilité. En outre, il convient d'utiliser les mêmes formes, dimensions et structures de films à plusieurs couches.

6 Conditions d'essai

6.1 Amplitude d'essai

Il convient de spécifier l'amplitude d'essai à partir de la résistance de référence appropriée du spécimen. Il convient de déterminer la résistance de référence en suivant les méthodes décrites en 7.1. Il convient de choisir une des procédures suivantes pour déterminer l'amplitude d'essai pendant les essais, en se basant sur la résistance de référence.

- a) Amplitude constante de 100 % de la résistance de référence:
pour évaluer la durée de vie en fatigue à une certaine amplitude.
- b) Diminuer l'amplitude progressivement depuis un niveau élevé:
pour obtenir une courbe S-N en peu de temps.
- c) Augmenter l'amplitude progressivement depuis un niveau bas:
pour obtenir une courbe S-N lorsque le nombre d'éprouvettes d'essai est limité.

Un exemple de données expérimentales et une analyse de l'essai de fatigue pour le silicium sont présentés à l'Annexe D pour servir de référence pour déterminer l'amplitude d'essai. Pour plus de détails sur les essais des matériaux en métal, se reporter à l'ISO 12107.

Il convient de sélectionner de préférence un pas de diminution et d'augmentation de l'amplitude d'essai pour les procédures b) et c) proche de l'écart type de la résistance de référence mesurée.

6.2 Rapport de charge

Le rapport de charge de la méthode d'essai peut être -1, parce que le facteur de qualité (Q) des vibrations à la résonance est suffisamment élevé (10 ou plus) pour obtenir une amplitude trop élevée pour être appliquée par des méthodes d'essai (quasi-)statiques.

6.3 Fréquence des vibrations

La fréquence doit être le mode de résonance auquel l'éprouvette d'essai est dans l'état de contrainte requis spécifié en 5.3 ou une fréquence proche.

6.4 Forme d'onde

La forme d'onde du déplacement du spécimen et de la contrainte et déformation de l'éprouvette peut être considérée sinusoïdale, indépendamment de la forme d'onde d'actionnement.

6.5 Temps d'essai

Le temps d'essai doit être spécifié comme le temps auquel l'essai se termine, même si le spécimen n'a pas montré de défaillance à la fin de l'essai. Le temps d'essai peut être déterminé comme le nombre de cycles d'essai, basé sur la fréquence de vibration. Pour les essais effectués sur des matériaux dont les caractéristiques de durée de vie dépendent de la fréquence, par exemple le silicium, les cycles d'essai sont choisis comme les cycles de contrainte appliqués aux dispositifs réels pendant leur durée de vie. Voir l'Annexe D.

6.6 Environnement d'essai

Il convient de maintenir constantes la température et l'humidité de l'environnement d'essai.

7 Mesure initiale

7.1 Mesure de la résistance de référence

La résistance de référence doit être mesurée avant l'essai de fatigue. Il convient de construire les spécimens utilisés pour la mesure de la résistance de référence avec les mêmes matériaux et en suivant les mêmes processus que ceux utilisés pour les éprouvettes d'essai. Si un spécimen de forme différente est utilisé, les précautions nécessaires doivent être prises. Si un tel spécimen est utilisé, il convient qu'il présente le même mode de défaillance et il convient de considérer l'effet de la taille sur la résistance mesurée.

Il convient de déterminer la résistance de référence en utilisant les essais suivants.

a) Essai quasi-statique

La résistance à une défaillance mesurée en effectuant un essai quasi-statique est définie comme la résistance de référence.

b) Essai de fatigue instantanée

L'amplitude maximale dans un essai de fatigue instantanée est définie comme la résistance de référence. Dans cet essai, l'amplitude augmente rapidement jusqu'au point de défaillance du spécimen par la même méthode que celle utilisée pour l'essai de fatigue. Cette méthode peut être choisie lorsqu'il est difficile d'utiliser un spécimen de forme différente ou lorsqu'il est difficile d'appliquer une charge statique.

c) Analyse de contrainte

La résistance de référence est déterminée en utilisant soit une simulation, soit une analyse théorique. Cette méthode peut être choisie lorsqu'il est difficile de déterminer expérimentalement une résistance de référence. L'amplitude à laquelle la contrainte maximale dans le spécimen atteint la résistance à une défaillance est définie comme la résistance de référence. La résistance à une défaillance peut être trouvée dans des publications ou autres données disponibles. Il convient de choisir avec soin la résistance rapportée. En effet, certains matériaux ont des effets de taille dans la résistance à une défaillance et des effets d'environnement lorsque les températures et les niveaux d'humidité varient. Il est donc souhaitable de se reporter aux valeurs de résistance indiquées dans les ouvrages de référence pour garder les conditions aussi proches que possible de celles de l'essai de durée de vie à effectuer.

Etant donné la grande variation de la résistance des matériaux fragiles tels que le silicium monocristallin, il est préférable d'obtenir les données de résistance pour au moins 10 spécimens lors de la mesure expérimentale de la résistance de référence, et d'adopter une valeur calculée de manière statistique (par exemple, 50 % de contrainte de défaillance à partir de l'analyse de Weibull ou selon une moyenne arithmétique) comme référence pour la contrainte ou la déformation dans l'essai d'oscillation à la résonance.

7.2 Essai de réponse en fréquence

Les propriétés de la résonance des spécimens doivent être mesurées avant l'essai de fatigue. Lorsque les propriétés de la résonance varient d'un spécimen à l'autre et si le contrôleur doit procéder à un accord, il convient de mesurer les propriétés de la résonance de tous les spécimens.

L'essai de réponse en fréquence est utilisé pour mesurer les propriétés de la résonance. Le signal d'oscillation est appliqué par un générateur de fonctions et on balaye les fréquences du signal autour des propriétés de la résonance prévues pour trouver la fréquence de résonance réelle. La charge appliquée dans cet essai de réponse en fréquence doit être assez petite pour ne pas perturber les mesures pour l'essai de fatigue. Si l'effet ne peut pas être ignoré, il convient d'ajouter le nombre de cycles de charge appliqués dans cet essai de réponse en fréquence aux données d'essai de fatigue.

8 Essai

8.1 Généralités

L'essai de fatigue doit être effectué en appliquant au spécimen une oscillation à la résonance à l'amplitude d'oscillation prédéterminée. L'essai se termine lorsque le spécimen est défaillant ou lorsque le temps d'essai prédéterminé est atteint.

8.2 Application de la charge initiale

Il convient de spécifier correctement le taux d'augmentation de l'amplitude au début de l'essai de fatigue. Puisque l'essai est effectué à la résonance et le facteur de qualité est élevé, l'amplitude ne peut pas atteindre l'amplitude de l'essai sans délai. Une augmentation trop rapide de l'amplitude peut entraîner un dépassement de l'amplitude et une défaillance accidentelle au début de l'essai. Par ailleurs, une augmentation trop lente de l'amplitude peut affecter le résultat de l'essai. Il convient de contrôler avec soin la charge initiale appliquée dans ces procédures pour ne pas perturber les résultats des mesures de l'essai de durée de vie. Lorsque certains effets sont envisageables, il convient de décrire les procédures pour augmenter l'amplitude dans le rapport d'essai.

8.3 Surveillance

Les vibrations du spécimen doivent être surveillées en permanence pendant l'essai pour détecter une défaillance du spécimen. Une méthode de surveillance pour cet essai consiste à surveiller la fréquence et/ou l'amplitude des vibrations. Il est également souhaitable d'enregistrer les variations de fréquence et d'amplitude des vibrations à des intervalles de temps appropriés. Si le système ne comporte pas de fonction de surveillance, le spécimen peut être surveillé en arrêtant l'essai de fatigue à certains intervalles de temps et en réalisant l'essai de réponse en fréquence présenté en 7.2.

8.4 Comptage du nombre de cycles

Le nombre de cycles de l'essai de fatigue doit être compté à l'aide d'un compteur. En variante, les cycles peuvent être calculés en multipliant la fréquence de vibration par le temps écoulé depuis le début de l'essai.

8.5 Fin de l'essai

L'essai doit se terminer lorsque le spécimen est défaillant ou après un temps de charge ou un nombre de cycles prédéterminé.

Une défaillance du spécimen est définie comme suit:

- a) rupture de l'éprouvette d'essai;

- b) une certaine variation de pourcentage de l'amplitude;
- c) une certaine variation de la fréquence d'oscillation.

8.6 Données enregistrées

La défaillance du spécimen doit être enregistrée. Il convient de mesurer la fréquence et l'amplitude des oscillations du spécimen et la température et l'humidité de l'environnement d'essai à certains intervalles de temps pendant l'essai.

9 Rapport d'essai

Le rapport d'essai doit fournir les indications suivantes.

- Obligatoires
 - a) la référence à la présente Norme internationale, c'est-à-dire la CEI 62047-12
 - b) le matériau de l'éprouvette d'essai
 - dans le cas d'un monocristal: l'orientation cristallographique
 - c) la méthode et les détails de fabrication de l'éprouvette d'essai
 - la méthode de dépôt de couches minces
 - les processus de fabrication
 - les conditions de traitement thermique (recuit)
 - d) la forme et les dimensions de l'éprouvette d'essai
 - e) les équipements d'essais
 - la méthode d'oscillation (auto-oscillation, oscillation externe)
 - la méthode d'application de la charge initiale
 - la méthode de contrôle de l'amplitude
 - la méthode de surveillance d'essai (amplitude, fréquence, nombre)
 - f) les conditions d'essai de fatigue
 - la résistance de référence et sa méthode de mesure
 - la contrainte moyenne (dans le cas de commande de déplacement, de déplacement moyen)
 - l'amplitude des contraintes (dans le cas de commande de déplacement, l'amplitude des déplacements)
 - le rapport de charge
 - l'environnement d'essai (température et humidité relative)
 - la forme d'onde (sinusoïdale)
 - la fréquence
 - g) le résultat d'essai de fatigue
 - le nombre d'échantillons
 - le nombre de cycles appliqués avant défaillance. Si l'éprouvette d'essai ne se rompt pas au cours d'un nombre prédéterminé de cycles, il convient de noter le nombre de cycles et la description "pas de défaillance".
 - la définition (le type) de défaillance

- Facultatives
 - a) l'objectif de l'essai
 - la motivation ou l'objet
 - b) la microstructure
 - dans le cas de couche mince polycristalline: la texture et la taille de grain
 - c) la contrainte interne
 - d) la conception des masques
 - la résolution de la lithographie et du dessin des masques
 - e) la rugosité de surface de l'éprouvette d'essai
 - les photographies de l'éprouvette d'essai finie, avec tout traitement de surface (procédure de nettoyage)
 - f) une brève description des caractéristiques de rupture
 - g) les résultats détaillés de l'essai
 - la courbe S-N (S est la contrainte de crête ou l'amplitude de la contrainte)
 - la résistance en fatigue, traitement statistique (probabilité de fatigue)
 - l'historique de l'amplitude
 - la fractographie.

Annexe A (informative)

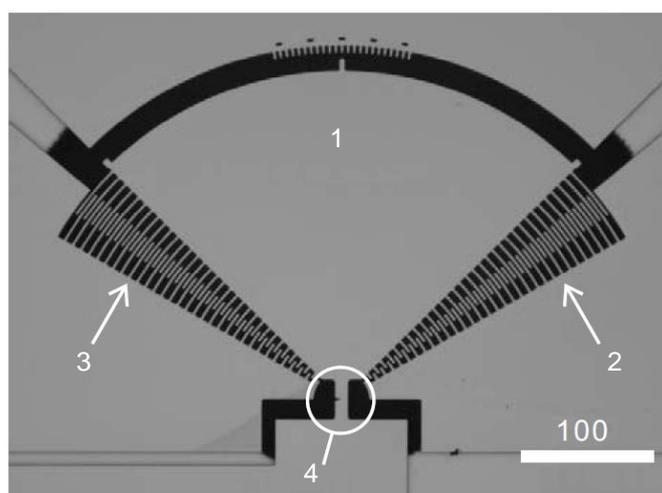
Exemple d'essai utilisant un dispositif électrostatique avec un composant d'actionnement intégré et un composant de détection de déplacement

A.1 Spécimen

Le spécimen est constitué d'une éprouvette d'essai à poutre flexible et d'une masse en forme d'éventail fabriqué par gravure sèche d'une couche mince de silicium monocristallin comme cela est représenté à la Figure A.1. Une extrémité de la poutre flexible est fixée à la masse, l'autre extrémité est fixée à un substrat. Un actionneur microrésonateur électrostatique est connecté à la masse, et la poutre flexible peut se courber dans le plan. Une électrode en peigne attachée à la masse délivre un signal proportionnel au déplacement et la flexion de la masse peut être lue au microscope. Puisqu'il est utilisé pour le capteur et l'actionneur électrostatique, le matériau d'essai est conducteur.

La fréquence de résonance du spécimen est déterminée par le moment d'inertie de la masse et la rigidité à la flexion de la poutre flexible. La fréquence fondamentale de résonance des vibrations dans le plan de l'éprouvette d'essai varie entre 38,75 kHz et 39,71 kHz. Cette variation est principalement due à l'épaisseur non uniforme de la couche mince formée sur la structure. En se basant sur une mesure de la réponse du déplacement lorsqu'un signal externe était appliqué à l'actionneur, la valeur de Q de l'oscillateur dans l'atmosphère a été estimée à 370. Pour augmenter la valeur de Q de l'oscillateur, la surface inférieure du substrat de l'oscillateur a été retirée par gravure. Aucune résonance autre que les vibrations dans le plan n'a été observée dans les fréquences proches. L'essai a été réalisé à la fréquence de résonance du mode de vibration dans le plan.

Dimensions en micromètres



IEC 2065/11

Légende

- | | |
|--------------|----------------------|
| 1 Résonateur | 2 Actionneur |
| 3 Capteur | 4 Eprouvette d'essai |

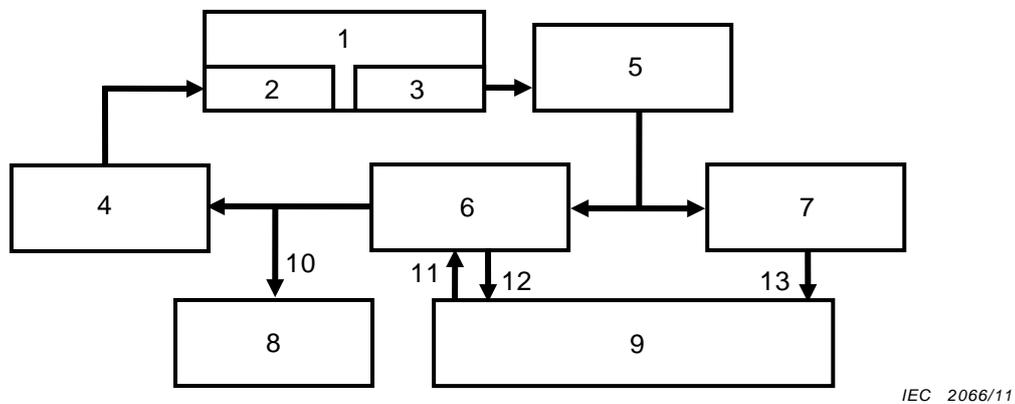
Figure A.1 – Image du spécimen au microscope

L'éprouvette d'essai était composée de silicium monocristallin avec une couche SOI (silicium sur isolant) active de 10 μm de largeur, 30 μm de longueur et 5 μm d'épaisseur et des surfaces gravées sur les côtés. Avec la déformation par courbure dans le plan, la contrainte

sur les surfaces des parois latérales constituait une cause possible de défaillance. Pour éliminer l'influence de la rugosité de la surface sur les parois latérales, des mesures ont été prises pour obtenir une surface latérale aussi lisse que possible par lithographie et gravure. Puisqu'on a considéré qu'on ne pouvait pas appliquer une contrainte suffisante pour entraîner une défaillance aux éprouvettes d'essai avec une structure de poutre uniquement, une encoche de 4 µm de profondeur a été faite au milieu d'un côté de l'éprouvette d'essai. L'extrémité de l'encoche était un demi-cercle de 0,5 µm de rayon et le comportement de la concentration de la contrainte a été évalué par la méthode des éléments finis.

A.2 Equipement d'essai

L'équipement d'essai pour appliquer l'oscillation à la résonance au spécimen était constitué d'un circuit électrique seul. Les mécanismes d'actionnement et de détection étaient intégrés au spécimen. Le schéma fonctionnel de l'équipement d'essai est représenté à la Figure A.2. Les vibrations à la résonance ont été appliquées au spécimen par une méthode d'auto-oscillation.



Légende

- | | |
|-----------------------------------|--|
| 1 Eprouvette d'essai | 2 Actionneur |
| 3 Capteur | 4 Excitateur |
| 5 Circuit oscillant | 6 Contrôleur automatique de gain |
| 7 Convertisseur fréquence-tension | 8 Oscilloscope |
| 9 Ordinateur de contrôle | 10 Moniteur de forme d'onde oscillante |
| 11 Référence d'amplitude | 12 Sortie amplitude |
| 13 Sortie fréquence | |

Figure A.2 – Schéma fonctionnel de l'équipement d'essai

Huit ensembles d'équipement d'essai ont été fabriqués pour fonctionner en parallèle. Lorsque l'alimentation et la carte de circuit sont partagées selon ce type de configuration, une oscillation stable peut être perturbée par des interférences électriques. Ainsi, en réalisant les essais en parallèle, le couplage électrique a été réduit en sélectionnant des spécimens de fréquences légèrement différentes.

Le composant d'actionnement amplifie un signal d'excitation dont l'amplitude et la phase sont ajustées à partir du signal de déplacement pour produire une oscillation de retour. Le signal d'actionnement est amplifié par un amplificateur haute tension polarisé et il est délivré à l'actionneur microrésonateur électrostatique. La tension du signal d'excitation pendant une oscillation stable était $V_{pp} = 20 \text{ V}$ à $V_{pp} = 40 \text{ V}$.

L'amplitude de déplacement du spécimen a été mesurée en détectant la capacité des électrodes en peigne. La capacité du peigne a été mesurée par un amplificateur de charge. On a ainsi obtenu un signal électrique proportionnel au déplacement angulaire. L'amplitude a

été observée simultanément en lisant la flexion au microscope, ce qui a permis d'étalonner le signal électrique.

Puisque la force appliquée à l'éprouvette d'essai n'est pas mesurable par cette technique, la contrainte appliquée à l'éprouvette d'essai est évaluée par une analyse par la méthode des éléments finis basée sur le déplacement angulaire mesuré de la masse.

En utilisant le circuit d'oscillation à auto-excitation, le spécimen vibre à la fréquence de résonance. Pour garder le déplacement du spécimen à un niveau constant, un contrôleur automatique de gain (CAG) est intégré au circuit d'oscillation. L'amplitude du spécimen peut être contrôlée par voie logicielle, puisque la tension de référence du CAG est contrôlée en utilisant la sortie de tension analogique d'un ordinateur.

Si la valeur définie pour l'amplitude du CAG du circuit de contrôle des vibrations est augmentée rapidement, le délai de la résonance mécanique due à la valeur élevée de Q peut déstabiliser l'oscillation. Des vibrations instables apparaissent après quelques dizaines de millisecondes, et quelques millisecondes plus tard, l'éprouvette d'essai est défaillante en raison d'un dépassement des vibrations. Pour empêcher ceci, la valeur définie pour l'amplitude du CAG a été augmentée linéairement pendant 10 s sous le contrôle d'un ordinateur. Cette approche a entraîné une augmentation de l'amplitude des oscillations avec des vibrations stables et la valeur de consigne a été atteinte sans dépassement. Le temps nécessaire pour augmenter l'amplitude était court par rapport à la durée de vie en fatigue et a donc été exclu des résultats des essais.

Dans cette méthode d'essai, le signal de déplacement électrique est la sortie à observer. Tant que ce signal est stable au sens sinusoïdal, on peut supposer que le spécimen vibre de manière stable, sans défaillance. Lorsque l'éprouvette d'essai est défaillante, la forme sinusoïdale du signal est soudainement rompue. La forme d'onde du signal de déplacement a été observée pendant une courte période de temps à l'oscilloscope, alors que le signal de déplacement à long terme a été enregistré en prenant l'amplitude détectée du CAG à des intervalles définis. La température et l'humidité ont été mesurées en même temps.

Le signal d'amplitude et le signal de fréquence mesurés ont été enregistrés toutes les secondes par un circuit convertisseur analogique-numérique pour déterminer si une défaillance a eu lieu ou non. Dans certains essais, le signal de déplacement au moment de la défaillance était enregistré par un oscilloscope numérique (l'enregistrement était déclenché par une chute du signal de déplacement).

A.3 Conditions d'essai

En raison de la difficulté d'effectuer un essai de résistance statique ou quasi-statique dans ce système d'essai, l'amplitude de référence pour ce spécimen a été déterminée par des essais de fatigue préliminaires. Le rapport de contraintes était -1 , puisque le même déplacement était systématiquement observé au microscope sur les deux côtés.

La fréquence de vibration était mesurée par un convertisseur fréquence-tension. Aucune variation de fréquence supérieure à la résolution (environ 200 Hz) n'a été observée pendant l'essai. Le temps d'essai était de 168 h. L'essai a été réalisé avec les éprouvettes d'essai placées dans une chambre dont l'humidité et la température étaient contrôlées (température $23,0\text{ °C} \pm 0,1\text{ °C}$, humidité relative 49 % à 51 % et 24 % à 27 %).

A.4 Mesure initiale

La seule mesure initiale était un essai de réponse en fréquence du spécimen. L'essai a été réalisé en appliquant un signal sinusoïdal à l'actionneur à partir d'un oscillateur externe et en observant le déplacement en sortie. La fréquence de résonance de tous les spécimens a été contrôlée avant l'essai de durée de vie. En outre, l'auto-oscillation et la stabilité ont été

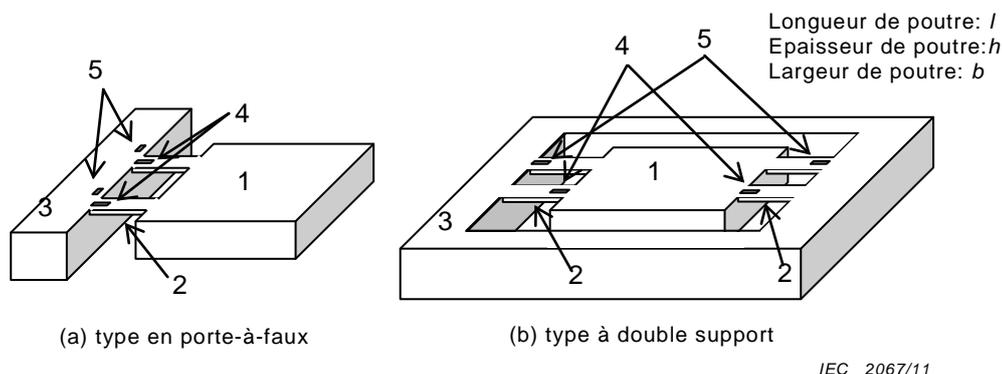
contrôlées pendant une courte période de temps (environ 1 min) avec les spécimens configurés comme un circuit de rétroaction. Les amplitudes d'oscillation pour ces mesures initiales n'ont pas dépassé l'amplitude minimale pour les essais de durée de vie et on considère donc qu'elles n'ont pas d'effet sur les résultats des essais. Aucun spécimen dont les vibrations étaient stables n'a été trouvé défaillant pendant la mesure initiale.

Annexe B (informative)

Exemple d'essai utilisant une excitation externe et un dispositif avec jauge de déformation intégrée pour détecter un déplacement

B.1 Spécimen

Le spécimen est fabriqué par micro-usinage de volume d'une tranche de silicium monocristallin, comme cela est représenté à la Figure B.1. Dans ce système, la masse est supportée par deux ou quatre poutres, déplacées verticalement par rapport à la surface du substrat. Quatre jauges de déformation sont fabriquées dans les poutres et connectées en pont de Wheatstone. Les variations de résistance en raison des déformations des poutres peuvent être détectées au niveau de la tension de sortie. Le déplacement est contrôlé à la sortie du pont de la jauge de déformation. Une connexion en pont est formée en disposant les jauges par paires où la déformation est générée dans le sens opposé. La relation entre le déplacement et la sortie du pont est étalonnée à l'avance.



Légende

- | | |
|--|--|
| 1 Résonateur | 2 Epreuve d'essai |
| 3 Châssis | 4 Jauge de déformation (polarité positive) |
| 5 Jauge de déformation (polarité négative) | |

Figure B.1 – Structure du spécimen

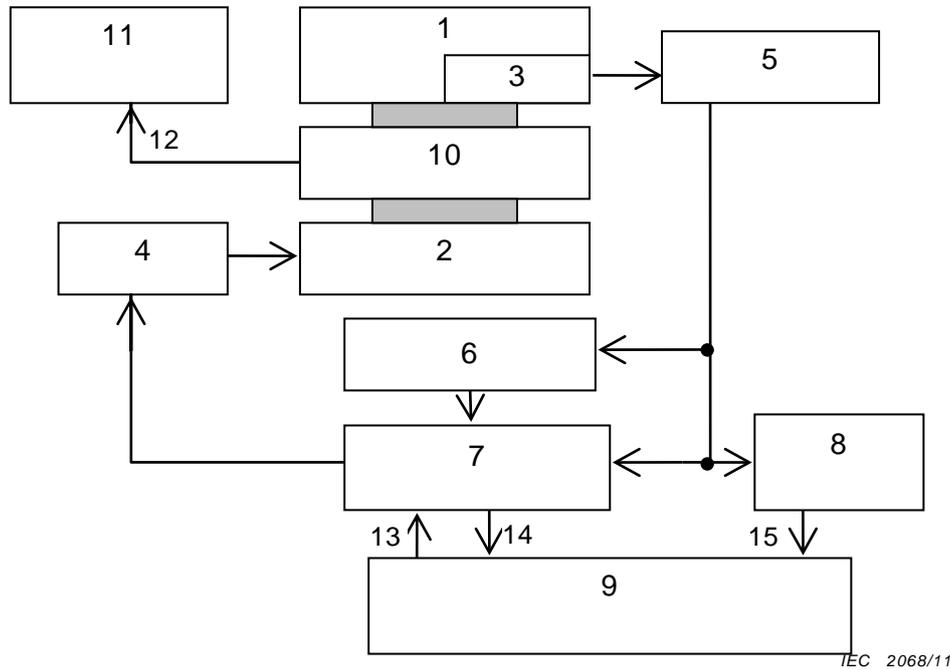
L'éprouvette d'essai est faite de silicium monocristallin par gravure sèche anisotrope. Des jauges de déformation sont formées sur la surface du spécimen pour détecter l'amplitude. La déformation maximale se produisant sur le spécimen est étalonnée à l'avance par une analyse par la méthode des éléments finis de la relation entre la contrainte maximale et le déplacement vertical de la masse. La contrainte maximale peut être évaluée à partir de la tension de sortie de la jauge de déformation.

A titre d'exemple, un résonateur en silicium monocristallin à double support a été soumis à un essai. La masse mesurait 1 mm de large, 1,5 mm de long et 0,5 mm d'épaisseur. Les quatre poutres de suspension mesuraient 500 μm de long, 200 μm de large et 20 μm d'épaisseur. La fréquence de résonance observée pour le spécimen était comprise entre 8,5 kHz et 8,9 kHz.

B.2 Equipement d'essai

Un schéma fonctionnel de l'équipement d'essai est représenté à la Figure B.2. Le capteur est intégré au spécimen, comme cela est décrit à l'Article B.1. Un actionneur piézoélectrique empilé est utilisé comme actionneur. Le spécimen est monté sur le boîtier métallique et placé

sur l'actionneur piézoélectrique. L'accélération reçue par le résonateur est contrôlée à l'aide d'un vibromètre.



Légende

- | | |
|----------------------------------|--|
| 1 Eprouvette d'essai | 2 Actionneur |
| 3 Capteur | 4 Excitateur |
| 5 Amplificateur | 6 Circuit à boucle à verrouillage de phase |
| 7 Contrôleur automatique de gain | 8 Convertisseur fréquence-tension |
| 9 Ordinateur de contrôle | 10 Vibromètre |
| 11 Oscilloscope | 12 Contrôle de la forme d'onde oscillante |
| 13 Référence d'amplitude | 14 Sortie de l'amplitude |
| 15 Sortie de la fréquence | |

Figure B.2 – Schéma fonctionnel de l'équipement d'essai

Un contrôleur de circuit d'excitation génère un signal d'actionnement, à partir du signal de déplacement, qui oscille aux vibrations à la résonance. Un circuit de contrôle automatique de gain est utilisé pour maintenir une amplitude constante réglée par l'enregistreur d'un ordinateur. L'ordinateur était utilisé pour contrôler l'amplitude obtenue à partir du circuit de contrôle et la tension de sortie proportionnelle à la fréquence. Huit ensembles de ce système ont fonctionné en parallèle.

Des précautions doivent être prises pour fixer le spécimen sur l'actionneur parce que les caractéristiques des vibrations varient fortement en fonction de l'état de la liaison.

Les mesures du signal de déplacement et du signal de fréquence convertie ont été enregistrées toutes les secondes par un circuit d'entrée de signal analogique d'un ordinateur pour observer si une défaillance a eu lieu ou non. Lorsque l'amplitude s'écartait de plus de 20 % de la gamme définie, elle était enregistrée et l'éprouvette d'essai était jugée défaillante.

B.3 Conditions d'essai

L'essai a été effectué avec des amplitudes allant de 60 % à 95 % de la résistance de référence. Le rapport de contraintes était -1.

L'essai de fatigue a été effectué à la fréquence de résonance. Dans les cas où les vibrations n'étaient pas linéaires dans le domaine des larges amplitudes, l'essai était également effectué à des fréquences légèrement inférieures à la résonance.

Le temps d'essai était de 35 h (environ 10^9 cycles).

Le spécimen était installé dans une salle blanche dont l'humidité était contrôlée (température $23,0\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$, humidité relative $(50 \pm 1)\%$ ou dans un conteneur étanche. L'essai était effectué avec: (1) une faible humidité obtenue en utilisant un déshydratant (air sec: température $23,0\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$, humidité relative $(50 \pm 1)\%$), (2) une circulation d'azote (faible humidité: température $23,0\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$, humidité relative $(50 \pm 1)\%$ et (3) de l'eau distillée contenant des bulles d'azote (température $23,0\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$, humidité relative $(50 \pm 1)\%$).

B.4 Mesure initiale

Les mesures de la résistance de référence ont été réalisées selon deux méthodes. La première était un essai quasi-statique dans lequel un indenteur appuyait sur le centre de la masse pour créer une défaillance. La deuxième méthode consistait à augmenter progressivement l'amplitude avec l'équipement d'essai et mesurer l'amplitude au point de défaillance. Bien que la première méthode soit une approche quasi-statique, l'oscillation à la résonance et le mode de déformation étaient différents. Il convient toutefois de considérer la deuxième méthode comme un essai de fatigue. L'amplitude normalisée était définie avec l'intensité moyenne obtenue à partir de ces essais de résistance.

Dans l'essai de réponse en fréquence du spécimen, un signal était appliqué à l'actionneur à partir d'un oscillateur externe et il était mesuré. Les fréquences de résonance de tous les spécimens étaient déterminées. En outre, l'auto-oscillation et la stabilité ont été contrôlées pendant une courte période de temps (environ 1 min) avec les spécimens configurés comme un circuit de rétroaction.

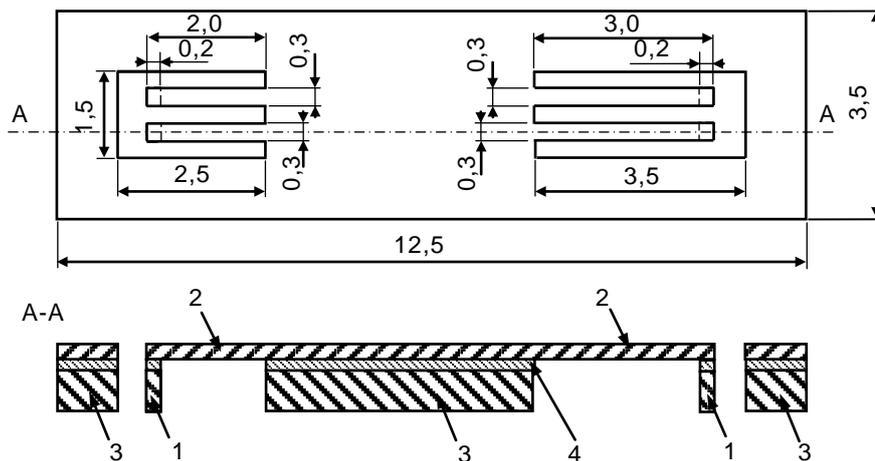
Annexe C
(informative)

Exemple d'essai aux vibrations par excitation électromagnétique hors plan (essai aux vibrations d'excitation externe)

C.1 Spécimen

Un essai de durée de vie pour un spécimen en porte-à-faux a été effectué en utilisant la résonance générée par une source d'excitation externe telle qu'un excitateur électromagnétique, puis en soumettant l'extrémité fixe du spécimen à une charge cyclique. Cette approche permet d'effectuer un essai de durée de vie en fatigue des composants en porte-à-faux dont les formes sont proches de celles des dispositifs à systèmes microélectromécaniques réels. Il devient donc avantageux que les dimensions des spécimens soient proches de celles des dispositifs des applications. La Figure C.1 représente un exemple de spécimen.

Dimensions en millimètres



IEC 2068/11

Légende

- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1 Résonateur | 2 Epreuve d'essai (silicium monocristallin de 2 μm d'épaisseur) |
| 3 Châssis (silicium monocristallin) | 4 Couche sacrificielle (dioxyde de silicium) |

Figure C.1 – Spécimen pour essai aux vibrations hors plan

La fréquence de résonance du spécimen en porte-à-faux est grossièrement estimée par les Equations (C.1) et (C.2). Il convient quand même de mesurer expérimentalement la valeur réelle.

$$f_c = 0,16154 \times \frac{h}{L^2} \sqrt{\frac{E_e}{\rho}} \tag{C.1}$$

où

- f_c est la fréquence de résonance du porte-à-faux;
- h est l'épaisseur de l'éprouvette d'essai;
- L est la longueur de l'éprouvette d'essai;

E_e est le module de Young efficace;
 ρ est la densité du matériau.

$$E_e = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (\text{C.2})$$

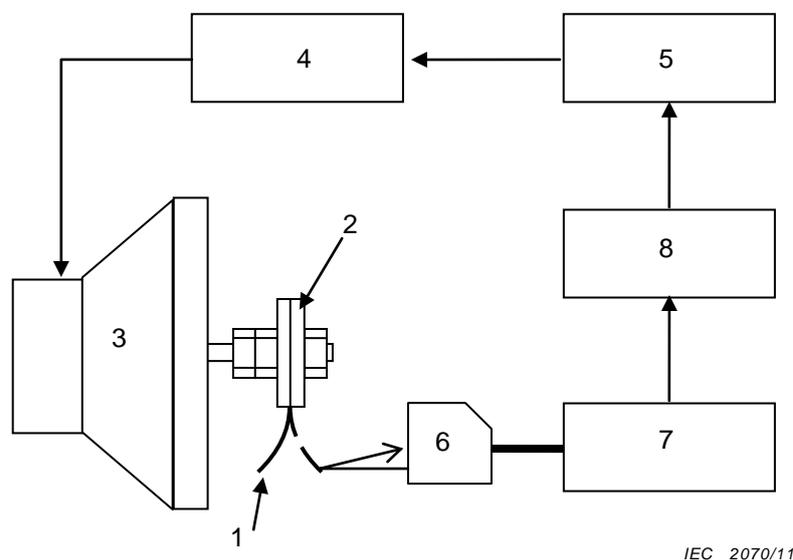
où

E_e est le module de Young efficace;
 E est le module de Young;
 ν est le coefficient de Poisson.

La résonance de l'éprouvette d'essai est améliorée en attachant une masse à l'extrémité du porte-à-faux, comme cela est représenté à la Figure C.1.

C.2 Equipements d'essai

Des contraintes en traction et en compression ont été appliquées à l'extrémité fixe de l'éprouvette d'essai en appliquant la vibration à la fréquence de résonance par un excitateur électromagnétique (voir Figure C.2). Un amplificateur et un haut-parleur audio ont été utilisés comme excitateur électromagnétique. Une onde sinusoïdale convient pour la forme d'onde d'excitation. Il convient d'utiliser un système de mesure de déplacement sans contact, tel qu'un dispositif de mesure de déplacement laser, pour mesurer le déplacement cyclique de l'éprouvette d'essai.



IEC 2070/11

Légende

- | | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 Eprouvette d'essai | 2 Support d'éprouvette d'essai |
| 3 Haut-parleur (actionneur) | 4 Amplificateur |
| 5 Générateur de fonctions | 6 Tête de capteur |
| 7 Capteur de déplacement laser | 8 Ordinateur de contrôle |

Figure C.2 – Schéma fonctionnel de l'équipement d'essai

L'essai de fatigue est réalisé en ajustant l'amplitude de la fréquence de résonance du spécimen. Etant donné que cette méthode d'essai est contrôlée en déplacement, une analyse

par la méthode des éléments finis peut être appliquée pour déterminer la contrainte au niveau des extrémités fixes, si nécessaire. Et étant donné que l'essai dure longtemps, il convient d'équiper le système de mécanismes pour détecter les défaillances des éprouvettes d'essai ainsi que d'équipements pour mesurer le temps d'essai.

La forme d'onde sinusoïdale du déplacement de l'excitateur électromagnétique peut être déformée lorsque la puissance d'entrée vers l'excitateur atteint des niveaux excessifs. Il convient d'effectuer l'essai de fatigue à une puissance inférieure à celle tolérée par l'excitateur. Pour ceci, on utilise un contrôleur de forme d'onde pendant l'essai. Si le spécimen n'est pas défaillant à l'amplitude d'excitation maximale de l'excitateur, un site de concentration de contrainte, par exemple une encoche, peut être introduit à proximité des extrémités fixes du spécimen. Dans ce cas, il convient de choisir correctement les dimensions de l'encoche par un essai réel ou par une analyse par la méthode des éléments finis.

C.3 Mesure initiale

Le déplacement de défaillance initial de l'éprouvette d'essai a été mesuré en appliquant une vibration suffisamment forte pour rompre immédiatement l'éprouvette d'essai. Il convient de choisir correctement le déplacement d'essai en se basant sur le déplacement de rupture initial.

Il convient de mesurer la fréquence de résonance de l'éprouvette d'essai en balayant les fréquences, des basses fréquences aux hautes fréquences, avec une amplitude aussi faible que possible par rapport au déplacement de défaillance initiale.

Annexe D (informative)

Expression théorique de la durée de vie en fatigue des matériaux fragiles basée sur la loi de Paris et la distribution de Weibull

D.1 Relation entre la durée de vie en fatigue et la contrainte

Les propriétés relatives à la fatigue de matériaux fragiles peuvent être expliquées en utilisant la loi de Paris si des défauts dans les matériaux sont modélisés comme des fissures de longueur équivalente. En appliquant la loi de Paris, la formule de la théorie sur l'extension de la propagation des fissures par fatigue équivalente est décrite ci-dessous.

NOTE L'effet du rapport de charges (contraintes) sur les propriétés de la fatigue du silicium n'a pas été pris compte dans l'analyse suivante.

La loi de Paris est typiquement la suivante:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n = C' \left(\frac{\Delta K}{K_c} \right)^n \quad (\text{D.1})$$

où

- a est la longueur de la fissure;
- N est le nombre de cycles;
- C , C' et n sont des constantes;
- ΔK est la plage du facteur d'intensité de contrainte correspondant à l'amplitude de la contrainte;
- K_c est la ténacité à la rupture.

Ainsi, on suppose que la longueur des fissures équivalentes aux dégâts est petite par rapport à la dimension des éprouvettes d'essai, et le facteur d'intensité de contrainte peut être évalué théoriquement de la manière suivante:

$$K = \beta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (\text{D.2})$$

où

- K est le facteur d'intensité de contrainte;
- a est la longueur de la fissure;
- β est le coefficient lié à la forme de la fissure;
- π est le nombre 3,141 592 6...
- σ est la contrainte appliquée.

Si la longueur de la fissure est suffisamment petite par rapport à l'éprouvette d'essai, le coefficient β est équivalent à celui d'une fissure superficielle d'un corps semi-infini, et elle peut donc être considérée constante. En intégrant l'Equation (D.1), la relation entre la durée de vie en fatigue N et la contrainte appliquée σ peut être obtenue par l'équation suivante:

$$N - 1 = \frac{a_{c0}}{C'} \frac{2}{2-n} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{c0}} \right)^{-2} \left[1 - \left(\frac{\sigma}{\sigma_{c0}} \right)^{2-n} \right] \quad (D.3)$$

où

- N est le nombre de cycles;
- a_{c0} est la longueur de la fissure initiale équivalente;
- σ_{c0} est la résistance statique;
- C' et n sont des constantes;
- σ est la contrainte appliquée.

Si ces variables sont affectées au membre de droite de l'Equation (D.2), on obtient un facteur d'intensité de contrainte correspondant à la ténacité.

D.2 Distribution de la durée de vie en fatigue

Si la durée de vie en fatigue est telle qu'elle est décrite dans l'Equation (D.3), il convient que la variation de la durée de vie en fatigue puisse être expliquée en termes de variation de la longueur de la fissure initiale équivalente. On suppose que la variation de la résistance statique suit la distribution de Weibull exprimée dans l'équation suivante:

$$F = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (D.4)$$

où

- F est la probabilité de rupture cumulative;
- m est le module de Weibull;
- σ_0 est le paramètre d'échelle;
- σ est la contrainte appliquée.

Lorsque la loi de Paris est appliquée à cette distribution en remplaçant la contrainte par une distribution de fissure équivalente en supposant que la ténacité est constante, la probabilité de rupture cumulative peut être calculée comme suit si une contrainte σ est appliquée pendant N cycles.

$$F = 1 - \exp \left(- \left\{ \left[a_c^{(2-n)/2} + C'(n-2)(\beta\sigma\pi^{0.5})^n (N-1) / (2K_c^n) \right]^{2/(2-n)} / a_0 \right\}^{-m/2} \right) \quad (D.5)$$

où

- F est la probabilité de rupture cumulative;
- a_0 est le paramètre d'échelle pour la distribution de Weibull de la longueur de la fissure initiale (la longueur de la fissure équivalente obtenue en remplaçant la contrainte σ par le paramètre d'échelle de Weibull σ_0 de l'Equation (D.4) dans l'Equation (D.2);

- a_c est la longueur de la fissure équivalente correspondant à une défaillance avec la contrainte σ ;
 β est le coefficient lié à la forme de la fissure;
 m est le module de Weibull;
 σ est la contrainte appliquée;
 N est le nombre de cycles;
 C' et n sont des constantes;
 K_c est la ténacité à la rupture;
 π est le nombre 3,141 592 6...

D.3 Effet d'une charge initiale

Pour un essai aux vibrations à la résonance, il est difficile de régler l'amplitude instantanément, mais l'amplitude des vibrations augmente progressivement au début. Dans cette section, l'effet de la procédure de charge initiale est évalué.

En supposant que l'amplitude augmente linéairement avec le nombre de cycles,

$$\sigma = \alpha N \quad (D.6)$$

où

- σ est la contrainte appliquée;
 α est la constante représentant la vitesse d'augmentation;
 N est le nombre de cycles.

En remplaçant cette équation et l'Equation (D.2) dans l'Equation (D.1), et en intégrant l'équation, on obtient l'équation suivante qui représente l'essai avec l'amplitude qui augmente de manière constante.

$$N_f - \frac{1}{N_f^n} = \frac{a_{c0}}{C'} \frac{2(n+1)}{2-n} \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_{c0}} \right)^{-2} \left[1 - \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_{c0}} \right)^{2-n} \right] \quad (D.7)$$

où

- N_f est le nombre de cycles avant rupture de l'échantillon pour la contrainte σ_f ;
 C' et n sont des constantes;
 σ_f est la contrainte à la rupture;
 a_{c0} est la longueur de la fissure initiale équivalente;
 σ_{c0} est la résistance statique.

On obtient la relation suivante en comparant les Equations (D.7) et (D.3):

$$N_f \approx (n+1)N \quad (D.8)$$

où

- N_f est le nombre de cycles avant rupture de l'échantillon pour la contrainte σ_f ;
- n est une constante;
- N est le nombre de cycles.

Ceci signifie que le nombre de cycles appliqués pendant la charge initiale correspond à $N_f/(n+1)$ cycles d'essai de fatigue à amplitude constante à σ_f . En supposant que la fréquence de résonance vaut 10 kHz et que le temps de charge initiale vaut 1 s, on a seulement 500 cycles équivalents à $n = 20$.

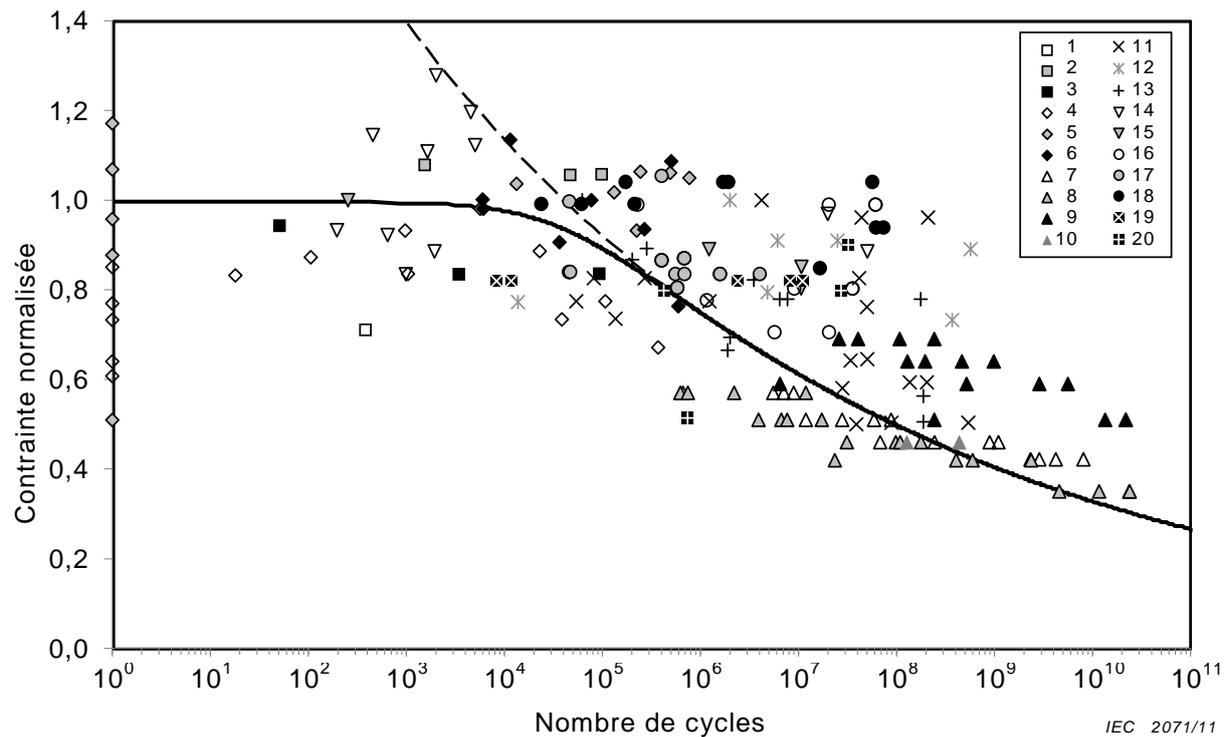
Annexe E (informative)

Exemples d'analyse

E.1 Résultats des essais de fatigue du silicium

Contrairement aux macro-structures traditionnelles, les structures à systèmes microélectromécaniques sont fabriquées à partir de différents nouveaux matériaux. Pour analyser les données à partir des essais de fatigue, il devient donc nécessaire de comprendre les différences de comportement de fatigue entre ces nouveaux matériaux et les matériaux métalliques plus communs. Le silicium, un des principaux matériaux de structure utilisés dans les systèmes microélectromécaniques, présente de grands écarts de résistance et de durée de vie en fatigue puisque les structures en silicium sont fabriquées par des processus de gravure sèche et humide.

La Figure E.1 représente une courbe S-N comme exemple de résultats d'essai de fatigue pour le silicium. Les données proviennent de différentes organisations et sont tracées sur un seul graphe. L'axe vertical représente la contrainte maximale pendant les essais de fatigue normalisés selon la contrainte de défaillance moyenne (résistance statique) avec une charge augmentant. L'axe horizontal représente le nombre de cycles avant défaillance.



Légende

1 Monocristallin <100> 10Hz	2 Monocristallin <110> 10Hz
3 Monocristallin <111> 10Hz	4 Monocristallin<110> 24,7-26,9°C HR 85-90 % 40 Hz
5 Monocristallin <110> 24 ,7-27,0°C HR 25-30 % 40 Hz	6 Monocristallin<110> 25,9-26,0°C HR 55-65 % 40 Hz
7 Monocristallin <110> 23 °C HR 25 % 39 kHz	8 Monocristallin <110> HR 23°C 50 % 39 kHz
9 Monocristallin <110> 23 °C HR 50 % 36 kHz	10 Monocristallin <110> 23°C HR 50 % 39 kHz
11 Monocristallin 23°C 14-31 kHz	12 Monocristallin 100°C 14-31 kHz
13 Monocristallin 300°C 14-31 kHz	14 Monocristallin 25°C HR 50-60 % 182-196 Hz
15 Monocristallin 25°C HR 50-60 % 155-176 Hz	16 Polycristallin 22°C HR 80 % 100 Hz
17 Polycristallin 22°C HR 80 % 250 Hz	18 Polycristallin HR 22°C 80 % 500 Hz
19 Monocristallin ICP-RIE 22°C HR 80 % 100 Hz	20 Monocristallin laser microjet 22°C HR 80 % 250 Hz

Figure E.1 – Exemple de résultats d'essai de fatigue pour les matériaux en silicium

Ces données ont été obtenues en utilisant différentes méthodes d'essai telles celles utilisant des charges quasi-statiques et dynamiques sous différents rapports de contraintes incluant une contrainte cyclique en traction alternée. Malgré les inévitables différences des conditions d'essai et la large dispersion des résultats d'essai, on peut discerner une tendance commune après la normalisation. Contrairement au cas des matériaux métalliques, la plupart des échantillons étaient défailants après 10^4 cycles, même pendant l'essai de fatigue avec des contraintes situées autour de la résistance statique moyenne. Ceci est une des caractéristiques importante du comportement en fatigue du silicium qui peut être considérée comme le principal facteur entravant les essais de fatigue du silicium.

E.2 Ajustement de la courbe S-N

L'Equation (D.3) a été ajustée aux données tracées sur la Figure E.1. La ligne continue de la Figure E.1 est la courbe S-N qui représente les résultats de l'ajustement avec les paramètres de régression a_{c0}/C' et n . La région plate de la ligne représente la résistance initiale qui peut correspondre au fait que seul un petit nombre des données de défaillance par fatigue a été observé en dessous de 10^4 cycles. Ce résultat montre que la loi de Paris est valide pour le silicium même jusqu'au niveau de contrainte autour de la résistance à la rupture, où les matériaux métalliques présentent une élasticité générale. Le second terme entre parenthèses du membre de droite de l'Equation (D.3) ne peut donc pas être ignoré. Si on ignore ce terme, la courbe S-N devient la courbe en pointillés qui ne peut pas décrire le comportement dans la région des cycles de faible fatigue.

E.3 Prédiction de durée de vie en fatigue du polysilicium

La Figure E.2 représente les résultats ajustés de l'Equation (D.5) pour un essai de fatigue en traction du polysilicium. Ici, la constante β valait 1,12. Dans cette représentation en 3D, l'axe z représente la probabilité de rupture cumulative, l'axe x représente la contrainte appliquée et l'axe y représente le nombre de cycles. Le quadrillage des lignes continues représente les valeurs calculées à partir de l'Equation (D.5) et les points noirs représentent les résultats de l'essai. Les résultats tracés de l'essai sont classés de la plus courte à la plus longue fissure initiale équivalente. Les valeurs calculées et les résultats de l'essai sont proches. Ceci signifie que la variation de la durée de vie en fatigue est étroitement liée à la distribution de la résistance statique.

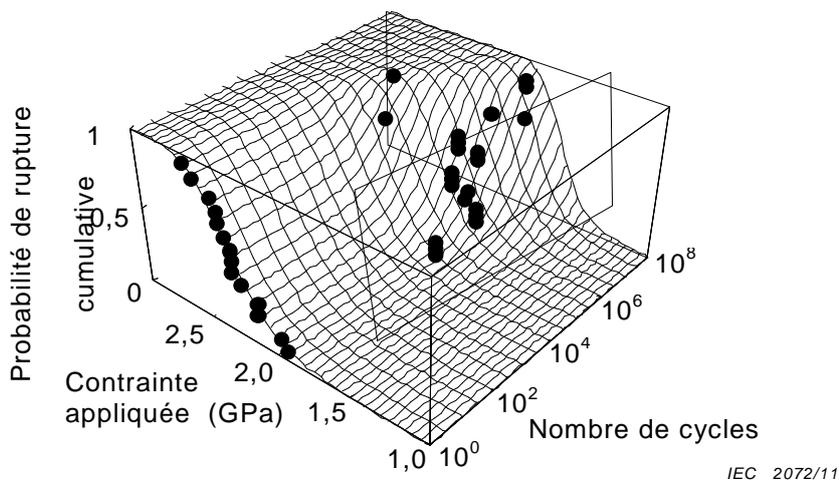


Figure E.2 – Tracé en 3D de la durée de vie en fatigue et de la résistance statique du polysilicium

Bibliographie

CEI 62047-2:2006, *Dispositifs à semiconducteurs – Dispositifs microélectromécaniques – Partie 2: Méthode d'essai de traction des matériaux en couche mince*

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