

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Test methods for electrical materials, printed boards and other interconnection structures and assemblies –

Part 2-721: Test methods for materials for interconnection structures –

Measurement of relative permittivity and loss tangent for copper clad laminate at microwave frequency using split post dielectric resonator

Méthodes d'essai pour les matériaux électriques, les cartes imprimées et autres structures d'interconnexion et ensembles –

Partie 2-721: Méthodes d'essai des matériaux pour structures d'interconnexion –

Mesure de la permittivité relative et de la tangente de perte pour les stratifiés recouverts de cuivre en hyperfréquences à l'aide d'un résonateur diélectrique en anneaux fendus



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2015 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

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

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

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

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

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

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

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

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

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

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

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Test methods for electrical materials, printed boards and other interconnection structures and assemblies –

Part 2-721: Test methods for materials for interconnection structures –

Measurement of relative permittivity and loss tangent for copper clad laminate at microwave frequency using split post dielectric resonator

Méthodes d'essai pour les matériaux électriques, les cartes imprimées et autres structures d'interconnexion et ensembles –

Partie 2-721: Méthodes d'essai des matériaux pour structures d'interconnexion –

Mesure de la permittivité relative et de la tangente de perte pour les stratifiés recouverts de cuivre en hyperfréquences à l'aide d'un résonateur diélectrique en anneaux fendus

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 31.180

ISBN 978-2-8322-2648-3

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.

Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.

CONTENTS

FOREWORD	4
1 Scope	6
2 Test specimens	6
2.1 Specimen size	6
2.2 Preparation	7
2.3 Marking	7
2.4 Thickness	7
3 Equipment/apparatus	7
3.1 General	7
3.2 Vector network analyzer (VNA)	8
3.3 SPDR test fixture	8
3.3.1 General	8
3.3.2 Parameters	8
3.3.3 Frequency	8
3.4 Verify unit	9
3.5 Micrometer	9
3.6 Circulating oven	9
3.7 Test chamber	9
4 Procedure	9
4.1 Preconditioning	9
4.2 Testing of relative permittivity and loss tangent at room temperature	9
4.2.1 Test conditions	9
4.2.2 Preparation	9
4.2.3 Fixture	10
4.2.4 Connection to VNA	10
4.2.5 VNA parameter	10
4.2.6 Frequency and Q-factor without specimen	10
4.2.7 Micrometer	10
4.2.8 Setting the specimen	10
4.2.9 Frequency and Q-factor with specimen	10
4.2.10 Comparison	10
4.2.11 Calculation	11
4.2.12 Change the specimen	12
4.2.13 Change in test frequency	12
4.3 Testing of relative permittivity and loss tangent at variable temperatures	12
4.3.1 Test conditions	12
4.3.2 Preparation	12
4.3.3 Fixture	12
4.3.4 Connection to VNA	12
4.3.5 VNA parameter	12
4.3.6 Temperature in the chamber	12
4.3.7 Frequency and Q-factor without specimen	12
4.3.8 Micrometer	12
4.3.9 Setting of the specimen	13
4.3.10 Frequency and Q-factor with specimen	13
4.3.11 Calculation	13

4.3.12	Options.....	13
4.3.13	Thermal coefficient	13
4.3.14	Change in test frequency	14
5	Report	14
5.1	At room temperature	14
5.2	At variable temperature.....	14
6	Additional information	14
6.1	Accuracy.....	14
6.2	Maintenance	14
6.3	Matters to be attended	15
6.4	Additional information concerning fixtures and results	15
6.5	Additional information on $K_{\varepsilon}(\varepsilon_r, h)$ and p_{ES}	15
Annex A	(informative) Example of test fixture and test result.....	16
A.1	Example of test fixture	16
A.2	Example of test result	16
Annex B	(informative) Additional information on $K_{\varepsilon}(\varepsilon_r, h)$ and p_{ES}	19
Bibliography		22
Figure 1	– Scheme of SPDR test fixture	6
Figure 2	– Component diagram of test system	8
Figure 3	– Scheme of the change of resonance frequency with or without the specimen	10
Figure A.1	– Test fixture	16
Figure A.2	– Relative permittivity versus frequency (laminate of Dk 3,8 and thickness 0,51 mm)	17
Figure A.3	– Loss tangent versus frequency (laminate of Dk 3,8 and thickness 0,51 mm)	17
Figure A.4	– Curve of relative permittivity and loss tangent at variable temperatures (laminate of Dk 3,8 and thickness 0,51 mm).....	18
Figure B.1	– $K_{\varepsilon}(\varepsilon_r, h)$ versus relative permittivity at different sample thicknesses	19
Figure B.2	– Distribution of the electric field of the split dielectric resonator (side view of the dielectric resonators)	20
Figure B.3	– Distribution of the electric field of the split dielectric resonator (top view between the dielectric resonators)	21
Figure B.4	– p_{ES} versus relative permittivity at different sample thicknesses	21
Table 1	– Specimen dimensions	7
Table 2	– SPDR test fixture's parameter	9
Table B.1	– Results of measurements of different materials using a 10 GHz SPDR.....	20

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**TEST METHODS FOR ELECTRICAL MATERIALS, PRINTED BOARDS AND
OTHER INTERCONNECTION STRUCTURES AND ASSEMBLIES –****Part 2-721: Test methods for materials for interconnection structures –
Measurement of relative permittivity and loss tangent for copper clad
laminate at microwave frequency using split post dielectric resonator**

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 61189-2-721 has been prepared by IEC technical committee 91: Electronics assembly technology.

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

FDIS	Report on voting
91/1246/FDIS	91/1258/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.

A list of all parts in the IEC 61189 series, published under the general title *Test methods for electrical materials, printed boards and other interconnection structures and assemblies*, can be found on the IEC website.

Future standards in this series will carry the new general title as cited above. Titles of existing standards in this series will be updated at the time of the next edition.

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

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

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

IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

TEST METHODS FOR ELECTRICAL MATERIALS, PRINTED BOARDS AND OTHER INTERCONNECTION STRUCTURES AND ASSEMBLIES –

Part 2-721: Test methods for materials for interconnection structures – Measurement of relative permittivity and loss tangent for copper clad laminate at microwave frequency using split post dielectric resonator

1 Scope

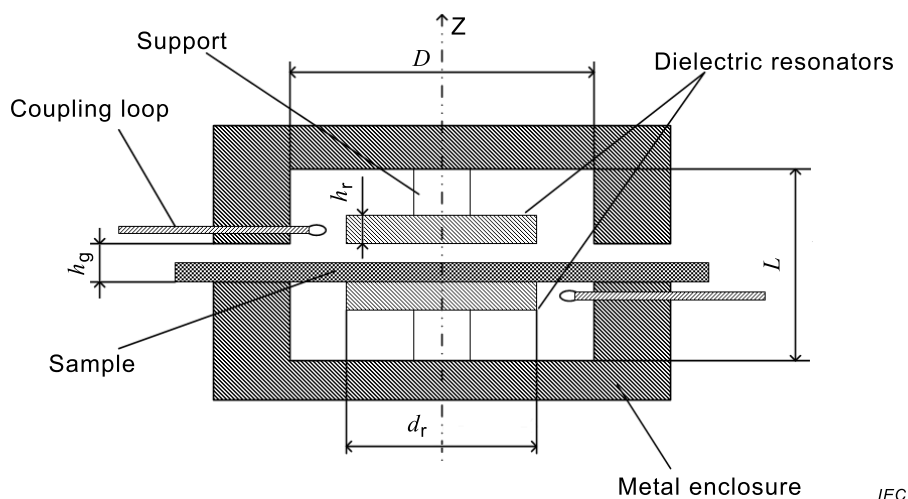
This part of IEC 61189 outlines a way to determine the relative permittivity (ϵ_r) and loss tangent ($\tan\delta$) (also called dielectric constant (Dk) and dissipation factor (Df)) of copper clad laminates at microwave frequencies (from 1,1 GHz to 20 GHz) using a split post dielectric resonator (SPDR).

This part of IEC 61189 is applicable to copper clad laminates and dielectric base materials.

2 Test specimens

2.1 Specimen size

The size of the specimen shall be larger than the internal diameter D of the metal enclosures, and the maximum thickness of the specimen shall be smaller than the distance h_g between the metal enclosures of the fixture. (See Figure 1.)



Key

- h_g distance between the metal enclosures of the fixture;
- D internal diameter of the metal enclosures;
- L internal height of the metal enclosures;
- d_r diameter of the dielectric resonator;
- h_r thickness of the dielectric resonator.

Figure 1 – Scheme of SPDR test fixture

Three specimens for the test at room temperature and one specimen for the test at variable temperatures are required for each SPDR test fixture for this test. Table 1 shows the supported specimen dimensions.

Table 1 – Specimen dimensions

SPDR test fixture's nominal frequency GHz	Supported specimen sizes mm	Maximum thickness of specimens mm
1,1	150 × 150	6,0
3	80 × 80	3,0
5 to 6	80 × 80	2,0
9 to 10	80 × 80	0,9
13 to 16	50 × 35	0,6
18 to 20	15 × 15	0,5

If applicable, a specimen size different from those given in Table 1 can be used. For example, specimen size “130 mm × 130 mm” can be used for 1,1 GHz.

2.2 Preparation

Copper clad laminates shall have all copper cladding removed by etching, and shall be thoroughly cleaned.

2.3 Marking

Mark each specimen in the upper left corner with an engraving pencil or other suitable method.

2.4 Thickness

Within the limits of the test fixture, the thicker the specimen is, the less error occurs in the measurements. Thin specimen can be stacked up to a minimum of 0,4 mm to improve measurement accuracy.

NOTE Air gaps between the sample and fixture do not affect the measurement.

3 Equipment/apparatus

3.1 General

The component diagram of the test system is shown in Figure 2.

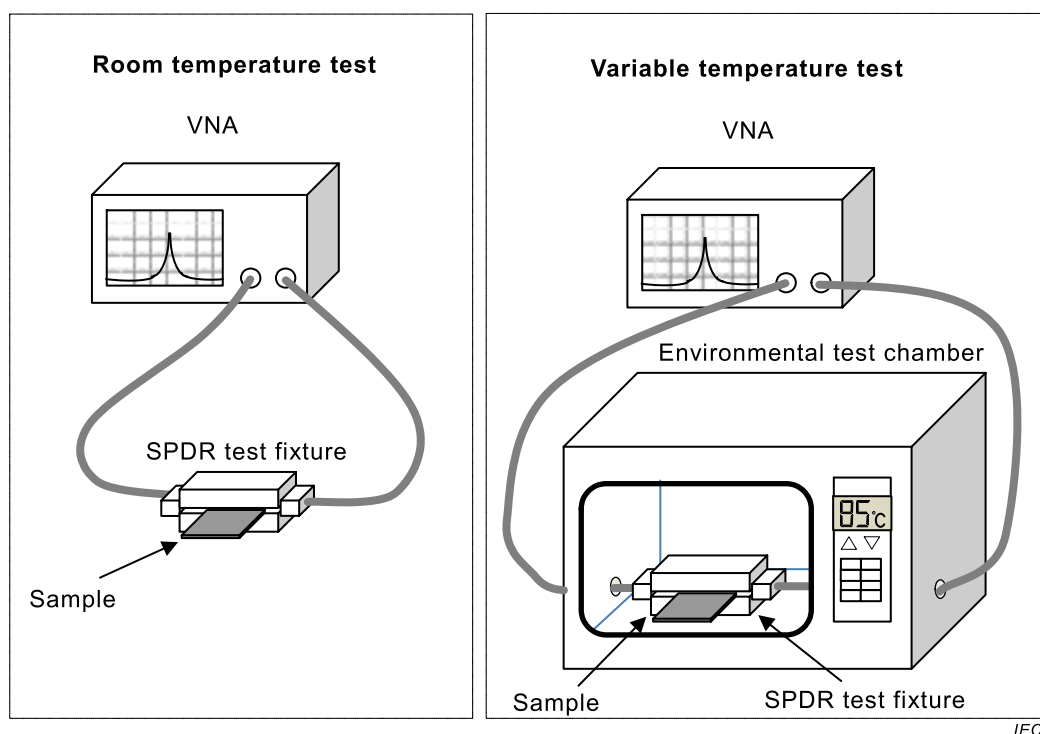


Figure 2 – Component diagram of test system

3.2 Vector network analyzer (VNA)

The following values are required:

- The frequency range of VNA shall be 500 MHz to 20 GHz.
- The dynamic range of VNA shall be more than 60 dB.

3.3 SPDR test fixture

3.3.1 General

Figure 1 shows the scheme of SPDR test fixture.

3.3.2 Parameters

Table 2 shows the typical relationship between the SPDR test fixture's nominal frequency and h_g and D .

3.3.3 Frequency

For different test frequencies, use a corresponding SPDR test fixture of nominal frequency.

Table 2 – SPDR test fixture's parameter

SPDR test fixture's nominal frequency GHz	D mm	h_g mm
1,1	120	6,0
3	50	3,0
5 to 6	30	2,0
9 to 10	22	0,9
13 to 16	15	0,6
18 to 20	10	0,5

3.4 Verify unit

The verify unit includes the following:

- a) Standard reference sample, for example, single-crystal quartz or equivalent sample.
- b) A calibration assembly of VNA.

3.5 Micrometer

Micrometer with 0,001 mm resolution (or better).

3.6 Circulating oven

Circulating oven with stabilized temperature at 105^{+5}_{-2} °C.

3.7 Test chamber

For the environmental test chamber for variable temperature testing the following requirements apply:

- a) Temperature ranges: –125 °C to +110 °C, other temperature range is as agreed between user and supplier.
- b) Temperature accuracy-set point to actual: ± 1 °C.

4 Procedure

4.1 Preconditioning

All specimens shall be conditioned at (23 ± 2) °C and (50 ± 5) % RH for at least 24 h prior to testing. However, if a specimen has recently been etched or exposed to excessive moisture, it should be dried in an air-circulating oven for 2 h at 105^{+5}_{-2} °C and then conditioned at the condition as mentioned above.

4.2 Testing of relative permittivity and loss tangent at room temperature

4.2.1 Test conditions

The ambient test temperature should be (23 ± 2) °C. The variation should not exceed 1 °C during the test.

4.2.2 Preparation

Allow at least 30 min for the VNA to warm up and stabilize.

4.2.3 Fixture

Select an SPDR test fixture in accordance with the test frequency. The specimen size and thickness shall comply with the requirements specified in Table 1. For example, if the test frequency is 10 GHz, a SPDR test fixture with 10 GHz nominal frequency should be selected. The supported specimen size is 80 mm × 80 mm and the maximum thickness of specimens is no more than 0,9 mm.

4.2.4 Connection to VNA

Connect the SPDR test fixture to the VNA. The test fixture shall be kept horizontal.

4.2.5 VNA parameter

Set the VNA parameters according to the manufacturer's instructions and the nominal frequency of the SPDR fixture.

4.2.6 Frequency and Q-factor without specimen

Measure the resonance frequency (f_0) and Q-factor (Q_0) values of the empty resonator.

4.2.7 Micrometer

Utilize a micrometer to measure the thickness of the specimen and record as h .

4.2.8 Setting the specimen

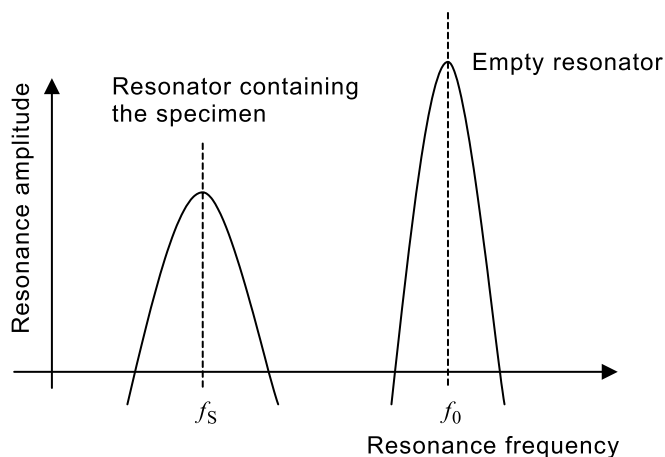
Insert the specimen into the test fixture. The side with marking is face up and the edge of this side has to be aligned with the fixture edge.

4.2.9 Frequency and Q-factor with specimen

Measure the resonance frequency (f_s) and Q-factor (Q_s) of the resonator containing the specimen.

4.2.10 Comparison

The scheme of the change of resonance frequency with or without the specimen is shown in Figure 3.



IEC

Figure 3 – Scheme of the change of resonance frequency with or without the specimen

4.2.11 Calculation

4.2.11.1 General

Calculation of relative permittivity and loss tangent at room temperature.

Relative permittivity and loss tangent at room temperature shall be calculated as follows. It is recommended to use the computer software provided by the equipment supplier for calculation.

4.2.11.2 Relative permittivity

The relative permittivity (ε_r) shall be calculated according to Equation (1).

$$\varepsilon_r = 1 + \frac{f_0 - f_s}{hf_0 K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)} \quad (1)$$

where

ε_r is relative permittivity;

h is the thickness of the specimen under test, in mm;

f_0 is the resonant frequency of the empty SPDR;

f_s is the resonant frequency of the resonator with the dielectric specimen;

$K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ is a function of ε_r and h . For a fixed resonant cavity, its physical parameters (size, dielectric resonators ε_r) should have been identified. $K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ is pre-computed and tabulated by electromagnetic field simulation with the strict Rayleigh-Ritz method. Put the empty SPDR frequency (f_0), the resonant frequency with dielectric specimen (f_s) and the thickness of the specimen (h) under test into Equation (1). Enter a similar arbitrary value of the relative permittivity of the sample, and use a successive approximation algorithm. After several iterations, end the calculation when the relative error of the last two calculated relative permittivities is less than 0,1 %. The last calculated data is taken as the relative permittivity of the specimen. Some additional information is shown in Annex B.

4.2.11.3 Loss tangent

The loss tangent shall be calculated according to Equation (2).

$$\tan \delta = \frac{(Q_S^{-1} - Q_{DR}^{-1} - Q_C^{-1})}{p_{es}} \quad (2)$$

where

$\tan \delta$ is the loss tangent;

Q_S is the unloaded Q-factor of a resonant fixture containing the specimen;

Q_C is the Q-factor depending on metal losses for the resonant fixture containing the specimen;

Q_{DR} is the Q-factor depending on dielectric losses in the dielectric posts for the fixture containing the specimen;

p_{es} is the electromagnetic energy filling factor of the specimen. After identifying the physical parameters of the resonant cavity, the electromagnetic energy filling factor p_{es} can be determined by electromagnetic field simulation. For a fixed resonant cavity, p_{es} is a constant value. Some additional information is showed in Annex B.

4.2.12 Change the specimen

Measure the two remaining specimens by repeating steps 4.2.6 through 4.2.11.

4.2.13 Change in test frequency

If another test frequency is selected, change the SPDR test fixture in accordance with the test frequency. Then repeat steps 4.2.3 through 4.2.12.

4.3 Testing of relative permittivity and loss tangent at variable temperatures

4.3.1 Test conditions

The ambient test temperature should be $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$. The variation should not exceed $1 ^\circ\text{C}$ during the test.

4.3.2 Preparation

Allow at least 30 min for the VNA to warm up.

4.3.3 Fixture

Select an SPDR test fixture in accordance with the test frequency. The specimen size and thickness shall comply with the requirements specified in Table 1. For example, if the test frequency is 10 GHz, an SPDR test fixture with 10 GHz nominal frequency should be selected. The supported specimen size is 80 mm × 80 mm and the maximum thickness of the specimen is no more than 0,9 mm.

4.3.4 Connection to VNA

Connect the SPDR test fixture to the VNA. The test fixture shall be kept in a horizontal position in the test chamber.

4.3.5 VNA parameter

Set the VNA parameters according to the manufacturer's instructions and the nominal frequency of the SPDR fixture.

4.3.6 Temperature in the chamber

Adjust the test temperature of the test chamber. After reaching the set temperature (T), hold it for at least 15 min.

4.3.7 Frequency and Q-factor without specimen

Measure the resonance frequency $f_0(T)$ and Q-factor $Q_0(T)$ of the empty resonator.

The resonance peak should be between -40 dB and -45 dB; adjust the position of the coupling loops to achieve this whilst ensuring their position is symmetrical.

When measuring the Q-factor, the frequency span of the VNA should be adjusted such that it is between 110 % and 200 % of the full width at half maximum of the resonant curve.

4.3.8 Micrometer

Use a micrometer to measure the thickness of the specimen, and record as h .

4.3.9 Setting of the specimen

The environmental test chamber shall be returned to room temperature. Insert the specimen into the test fixture. The side with marking is face up and the edge of this side has to be aligned with the fixture edge.

4.3.10 Frequency and Q-factor with specimen

Repeat step 4.3.6. Measure the resonance frequency $f_s(T)$ and Q-factor $Q_s(T)$ of the resonator with the specimen at temperature T .

When measuring the Q-factor, the frequency span of the VNA should be adjusted such that it is between 110 % and 200 % of the full width at half maximum of the resonant curve.

4.3.11 Calculation

Follow step 4.2.11 and calculate the value of the relative permittivity $Dk(T)$ and the loss tangent $Df(T)$ at temperature T .

4.3.12 Options

If another test temperature is selected, repeat steps 4.3.6 through 4.3.11.

4.3.13 Thermal coefficient

4.3.13.1 General

Thermal coefficient of relative permittivity and thermal coefficient of loss tangent.

4.3.13.2 Relative permittivity

The thermal coefficient of the relative permittivity ε_r (brief for $TC\varepsilon_r$) is the change rate of the relative permittivity per temperature change. The unit of $TC\varepsilon_r$ is $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Generally, the relative permittivity of a specimen at its base temperature T_{ref} of 23°C is used as the base relative permittivity $Dk(T_{\text{ref}})$. For temperature T , $TC\varepsilon_r$ shall be calculated according to Equation (3).

$$TC\varepsilon_r = \frac{Dk(T) - Dk(T_{\text{ref}})}{(T - T_{\text{ref}}) \times Dk(T_{\text{ref}})} \quad (3)$$

where

- $TC\varepsilon_r$ is the thermal coefficient of ε_r , $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;
- T is the test temperature, in $^{\circ}\text{C}$;
- T_{ref} is the base temperature, in $^{\circ}\text{C}$;
- $Dk(T)$ is the relative permittivity at temperature T ;
- $Dk(T_{\text{ref}})$ is the relative permittivity at temperature T_{ref} .

4.3.13.3 Loss tangent

The Thermal coefficient of $\tan\delta$ ($TC \tan\delta$) is the change rate of the loss tangent per temperature (every increase or decrease 1°C). The unit of $TC \tan\delta$ is $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Generally, the loss tangent of the specimen at base temperature T_{ref} of 23°C is used as the base loss tangent $Df(T_{\text{ref}})$. For temperature T , $TC \tan\delta$ is calculated according to Equation (4).

$$TC \tan\delta = \frac{Df(T) - Df(T_{\text{ref}})}{(T - T_{\text{ref}}) \times Df(T_{\text{ref}})} \quad (4)$$

where

$TC \tan \delta$ is thermal coefficient of $\tan \delta$, in ppm/°C;

T is the test temperature, in °C;

T_{ref} is the base temperature, in °C;

$Df(T)$ is the loss tangent at temperature T ;

$Df(T_{\text{ref}})$ is the loss tangent at temperature T_{ref} .

4.3.14 Change in test frequency

If another test frequency is selected, change the SPDR test fixture in accordance with the test frequency. Then repeat steps 4.3.3 through 4.3.13.

5 Report

5.1 At room temperature

For room temperature tests, report the following:

- test environment (temperature, humidity);
- test frequency;
- the values and the average values of the relative permittivity and loss tangent at test frequency;
- the preconditioning of the specimen;
- any anomalies in the test or variations from this test method.

5.2 At variable temperature

For variable temperature tests, report the following:

- test temperature (T) and base temperature (T_{ref});
- test frequency;
- $Dk(T)$ and $Df(T)$ at test temperature (T);
- $TC\varepsilon_r$ and $TC \tan \delta$;
- $Dk(T_{\text{ref}})$ and $Df(T_{\text{ref}})$;
- if more than one test temperature is necessary, report the curve diagram of the relative permittivity and loss tangent in accordance with the temperature variation;
- the preconditioning of the specimen;
- any anomalies in the test or variations from this test method.

6 Additional information

6.1 Accuracy

Accuracy of measurements of a sample of thickness h .

Permittivity measurement: $\Delta\varepsilon/\varepsilon = \pm(0,0015+\Delta h/h)$.

Loss tangent: $\Delta \tan \delta = \pm 2 \times 10^{-5}$ or $\pm 0,03 \tan \delta$ whichever is higher.

6.2 Maintenance

Clean the test heads, standard materials and fixtures regularly.

6.3 Matters to be attended

To prevent damage to the test fixture because of the variable temperature tests, verify the test system regularly with a standard reference sample. For example, single-crystal quartz is used as the standard reference sample of thickness 0,4 mm. The deviation of the relative permittivity measurement between the test result and the nominal value of the standard reference sample shall be less than $\pm 0,7\%$, while the deviation of the loss tangent shall be less than $\pm 2 \times 10^{-5}$.

6.4 Additional information concerning fixtures and results

An example of a test fixture and test result is shown in Annex A.

6.5 Additional information on $K_{\varepsilon}(\varepsilon_r, h)$ and p_{es}

Some additional information on $K_{\varepsilon}(\varepsilon_r, h)$ and p_{es} is shown in Annex B.

Annex A (informative)

Example of test fixture and test result

A.1 Example of test fixture

Figure A.1 shows a picture of an SPDR fixture at 5 GHz. Utilize a 3,5 mm female-to-female adapter to connect the coaxial cable and the SPDR test fixture.

An SPDR fixture has a coupling loop on both ends to adjust the coupling coefficient. The maximum thickness of the specimen of this fixture is 2 mm.

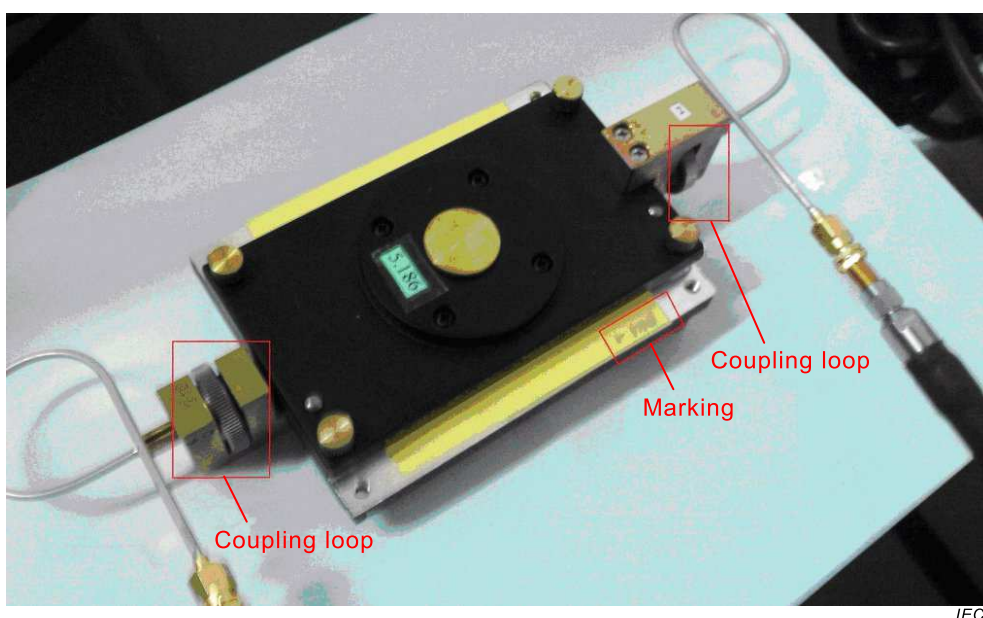
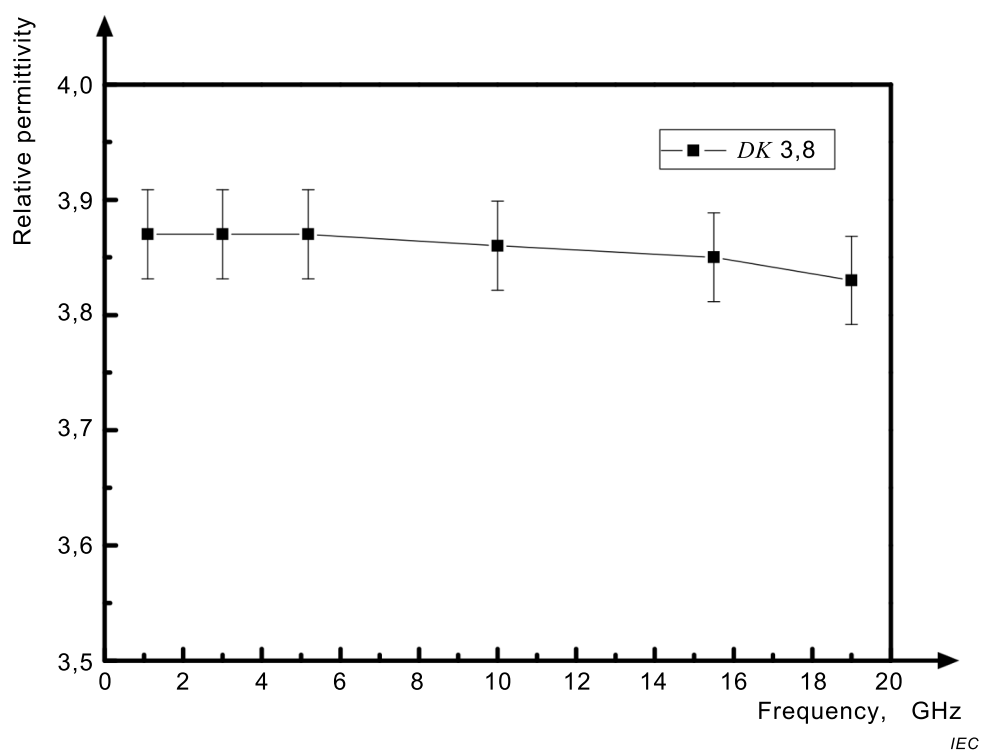


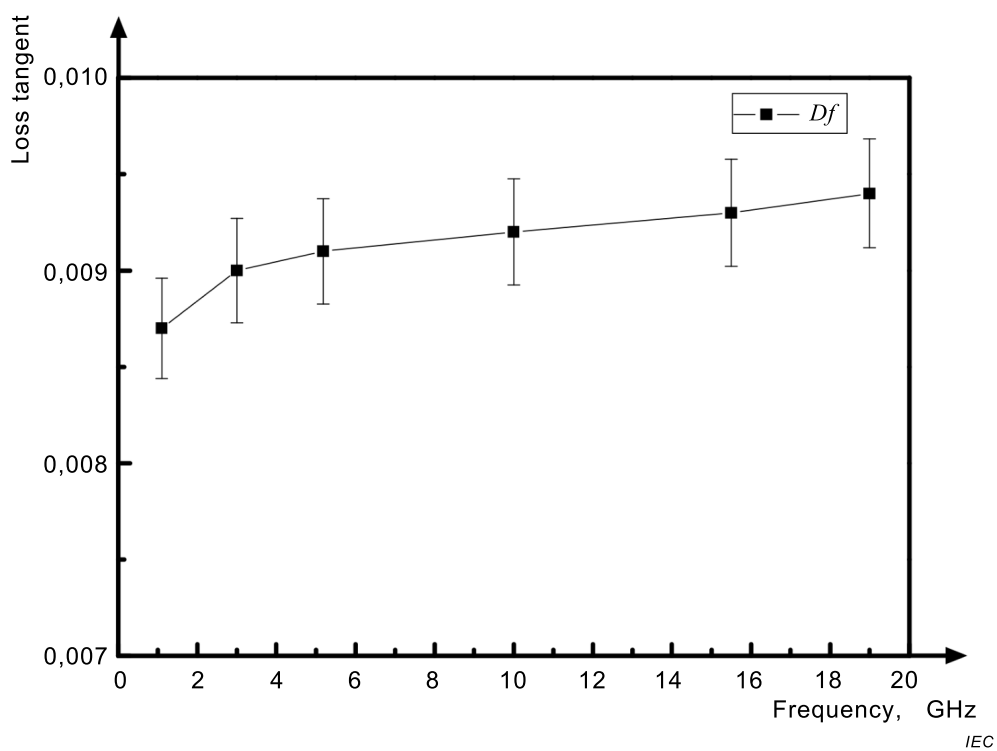
Figure A.1 – Test fixture

A.2 Example of test result

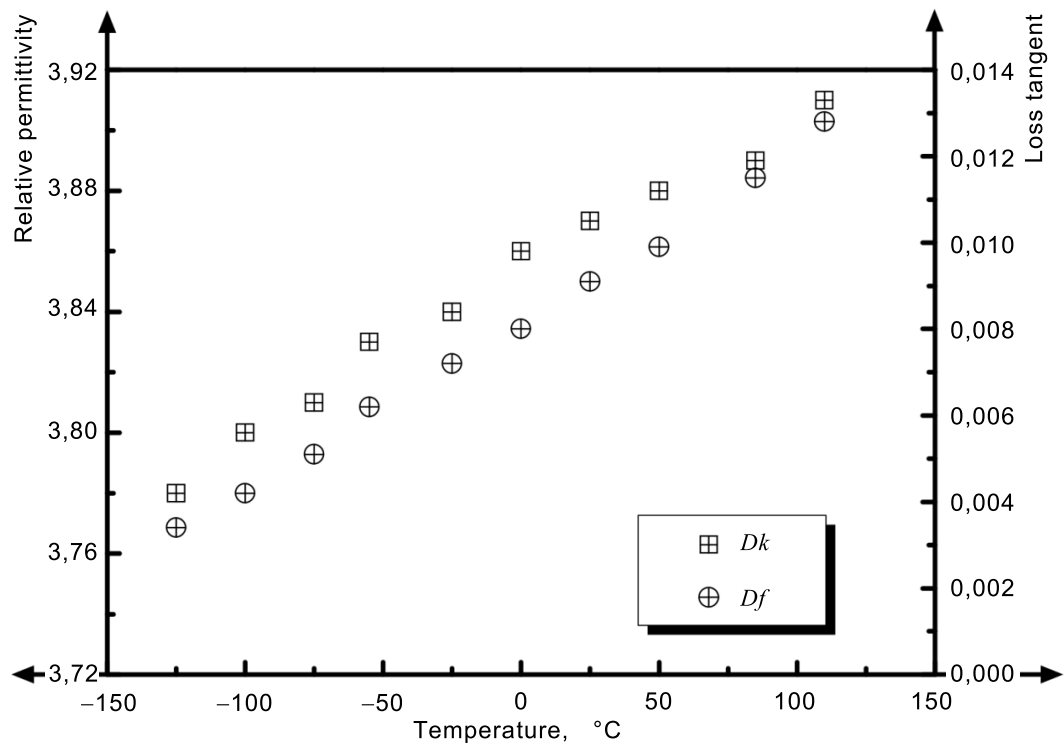
Figure A.2 and Figure A.3 show the typical measurement of relative permittivity and loss tangent at microwave frequencies (from 1,1 GHz to 19 GHz) for a copper clad laminate of ϵ_r 3,8. Figure A.4 shows the curve diagram of relative permittivity and loss tangent at variable temperatures (from $-125\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $110\text{ }^{\circ}\text{C}$) for a copper clad laminate of ϵ_r 3,8.



**Figure A.2 – Relative permittivity versus frequency
(laminate of D_k 3,8 and thickness 0,51 mm)**



**Figure A.3 – Loss tangent versus frequency
(laminate of D_f and thickness 0,51 mm)**



IEC

Figure A.4 – Curve of relative permittivity and loss tangent at variable temperatures (laminate of D_k 3,8 and thickness 0,51 mm)

Annex B (informative)

Additional information on $K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ and p_{es}

By definition $K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ function values are specified for a given resonant fixture and with fixed values ε_r and h as follows:

$$K_\varepsilon(\varepsilon_r, h) = \frac{f_0 - f_s}{(\varepsilon_r - 1)hf_0} \quad (\text{B.1})$$

The function $K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ is computed and tabulated for every specific SPDR. Exact resonant frequencies and the resulting values of $K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ are computed for a number of ε_r and h and tabulated. Interpolation has been used to compute $K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ for any other values of ε_r and h . The initial value of $K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ in the permittivity evaluation using Equation (1) is taken to be the same as its corresponding value for a given h and $\varepsilon_r = 1$. Subsequent values of $K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ are found for the subsequent dielectric constant values obtained in the iterative procedure. Because $K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ is a slowly varying function of ε_r and h , the iterations using Equation (1) converge rapidly. Figure B.1 shows $K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ versus relative permittivity at different sample thicknesses for a 10 GHz SPDR.

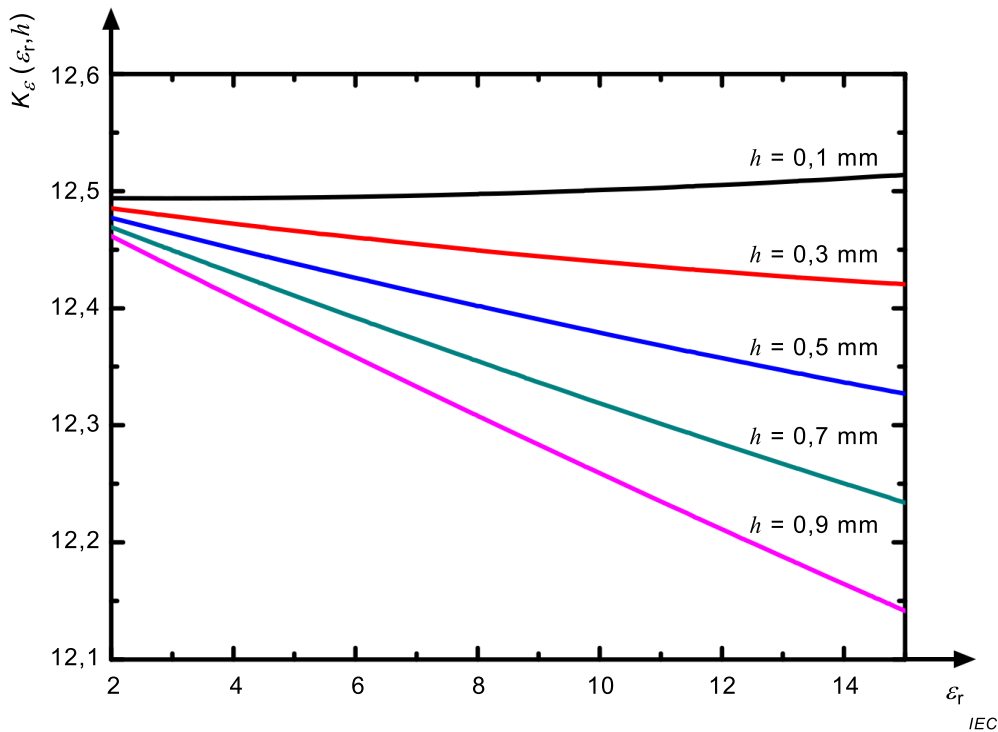


Figure B.1 – $K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ versus relative permittivity at different sample thicknesses

By definition the p_{es} value is specified for a given resonant fixture and with fixed values ε'_r and h as follows:

$$p_{es} = h\varepsilon'_r K_1(\varepsilon'_r, h) \quad (\text{B.2})$$

where

ε'_r is the relative permittivity;

h is the thickness of the specimen, mm;

$K_I(\varepsilon'_r, h)$ is a function of ε'_r and h .

The Rayleigh-Ritz method permits to compute the p_{es} value for a given resonant structure. These parameters have been computed for a number of h and ε'_r .

For a 10 GHz SPDR with resonant structure $D = 16,5$ mm, $L = 9$ mm, $d_r = 8$ mm, $h_r = 1$ mm, $h_g = 1$ mm and a relative permittivity of a dielectric resonator = 38, the distribution of the electric field component E in the split dielectric resonator operating at a nominal frequency (without sample) of 10 GHz is shown in Figure B.2 and Figure B.3.

Figure B.4 shows p_{es} versus relative permittivity at different sample thicknesses.

For a 10 GHz SPDR with different samples, the parameters are shown in Table B.1.

Table B.1 – Results of measurements of different materials using a 10 GHz SPDR

Dk	Df	Thickness mm	p_{es}	$K_g(\varepsilon_r, h)$	Q_c	Q_{DR}	Material
2,05	0,000 3	0,3	$8,3 \times 10^{-4}$	12,477	$> 10^5$	16 000	PTFE
3,0	0,003 0	0,3	$1,2 \times 10^{-3}$	12,412	$> 10^5$	16 000	Low- Dk FR4
3,8	0,009 0	0,3	3×10^{-3}	12,364	$> 10^5$	16 000	Low-loss FR4
4,5	0,015 0	0,3	$4,2 \times 10^{-3}$	12,332	$> 10^5$	16 000	Halogen-free FR4

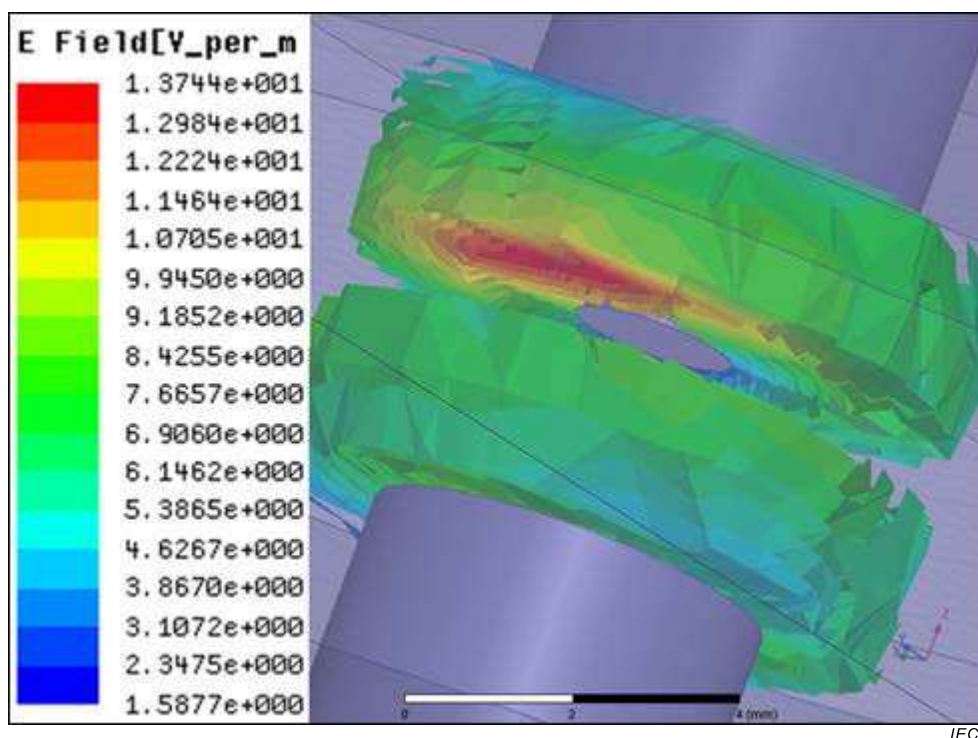


Figure B.2 – Distribution of the electric field of the split dielectric resonator (side view of the dielectric resonators)

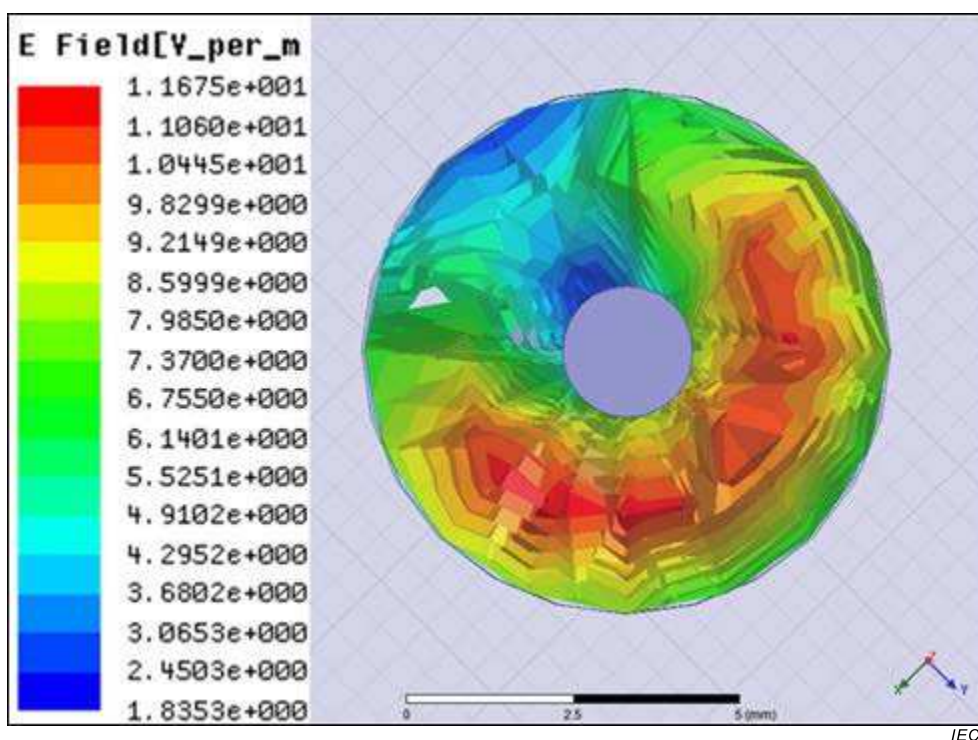


Figure B.3 – Distribution of the electric field of the split dielectric resonator (top view between the dielectric resonators)

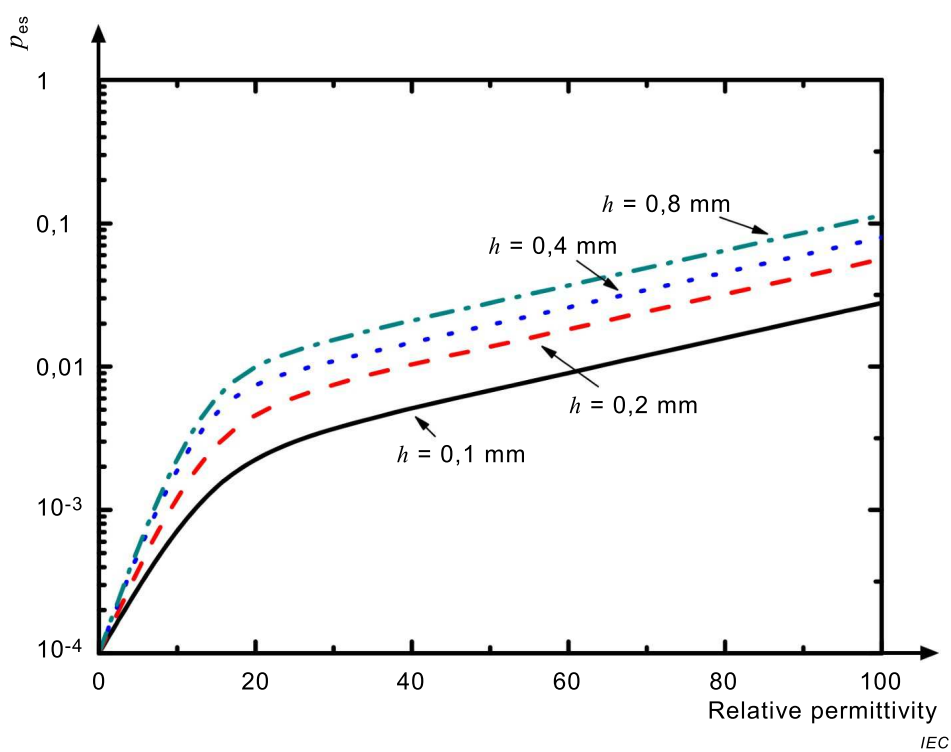


Figure B.4 – p_{es} versus relative permittivity at different sample thicknesses

Bibliography

- [1] Nishikawa, T.; Wakino, K.; Tanaka, H.; Ishikawa, Y., *"Dielectric Resonator Method for Nondestructive Measurement of Complex Permittivity of Microwave Dielectric Substrates,"* Microwave Conference, 1990. 20th European, vol.1, pp.501-506, 1990
- [2] Mazierska, J.; Krupka, J.; Jacob, M.V.; Ledenyov, D., *"Complex permittivity measurements at variable temperatures of low loss dielectric substrates employing split post and single post dielectric resonators,"* Microwave Symposium Digest, 2004 IEEE MTT-S International, vol.3, pp.1825-1828, 2004
- [3] Mazierska, J.; Jacob, Mohan V.; Harring, A.; Krupka, J.; Barnwell, P.; Sims, T., *"Measurements of loss tangent and relative permittivity of LTCC ceramics at varying temperatures and frequencies,"* Journal of the European Ceramic Society, vol. 23, issue 14, pp.2611–2615, 2003
- [4] Krupka, J.; Clarke, R.N.; Rochard, O.C.; Gregory, A.P., *"Split post dielectric resonator technique for precise measurements of laminar dielectric specimens-measurement uncertainties,"* Microwaves, Radar and Wireless Communications, 2000. MIKON-2000. 13th International Conference, vol.1, pp.305-308, 2000
- [5] Krupka, J.; Gregory, A.P.; Rochard, O.C.; Clarke, R.N.; Riddle, B.; Baker-Jarvis, J., *"Uncertainty of complex permittivity measurements by split-post dielectric resonator technique,"* Journal of the European Ceramic Society, vol. 21, issue 15, pp.2673-2676, 2001
- [6] Krupka, J.; Geyer, R. G.; Baker-Jarvis, J.; Ceremuga, J., *"Measurements of the complex permittivity of microwave circuit board substrates using split dielectric resonator and reentrant cavity techniques,"* Seventh International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications, (Conf. Publ. No. 430), pp. 21-24, 1996

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	26
1 Domaine d'application	28
2 Eprouvettes	28
2.1 Taille des épreuves	28
2.2 Préparation	29
2.3 Marquage	29
2.4 Epaisseur	29
3 Equipement/appareils	29
3.1 Généralités	29
3.2 Analyseur de réseau vectoriel (VNA)	30
3.3 Appareil d'essai SPDR	30
3.3.1 Généralités	30
3.3.2 Paramètres	30
3.3.3 Fréquence	30
3.4 Unité de vérification	31
3.5 Micromètre	31
3.6 Four à chaleur tournante	31
3.7 Chambre d'essai	31
4 Procédure	31
4.1 Préconditionnement	31
4.2 Essais de permittivité relative et de tangente de perte à température ambiante	31
4.2.1 Conditions d'essai	31
4.2.2 Préparation	31
4.2.3 Appareil	31
4.2.4 Connexion au VNA	32
4.2.5 Paramètres du VNA	32
4.2.6 Fréquence et facteur de surtension sans épreuve	32
4.2.7 Micromètre	32
4.2.8 Réglage de l'épreuve	32
4.2.9 Fréquence et facteur de surtension avec épreuve	32
4.2.10 Comparaison	32
4.2.11 Calcul	33
4.2.12 Changement d'épreuve	34
4.2.13 Changement de fréquence d'essai	34
4.3 Essais de permittivité relative et de tangente de perte à température variable	34
4.3.1 Conditions d'essai	34
4.3.2 Préparation	34
4.3.3 Appareil	34
4.3.4 Connexion au VNA	34
4.3.5 Paramètres du VNA	34
4.3.6 Température de la chambre d'essai	34
4.3.7 Fréquence et facteur de surtension sans épreuve	34
4.3.8 Micromètre	34
4.3.9 Réglage de l'épreuve	35
4.3.10 Fréquence et facteur de surtension avec épreuve	35

4.3.11	Calcul	35
4.3.12	Options	35
4.3.13	Coefficient thermique	35
4.3.14	Changement de fréquence d'essai	36
5	Rapport	36
5.1	A température ambiante	36
5.2	A température variable	36
6	Informations complémentaires	36
6.1	Précision	36
6.2	Maintenance	37
6.3	Éléments à prendre en compte	37
6.4	Informations complémentaires relatives aux appareils et aux résultats	37
6.5	Informations complémentaires relatives à $K_{\varepsilon}(\varepsilon_r, h)$ et p_{es}	37
Annexe A (informative)	Exemple d'appareil d'essai et de résultats d'essai	38
A.1	Exemple d'appareil d'essai	38
A.2	Exemple de résultats d'essai	38
Annexe B (informative)	Informations complémentaires relatives à $K_{\varepsilon}(\varepsilon_r, h)$ et p_{es}	41
Bibliographie		44
Figure 1	– Schéma de l'appareil d'essai SPDR	28
Figure 2	– Diagramme des composants du système d'essai	30
Figure 3	– Schéma montrant le changement de fréquence de résonance avec ou sans éprouvette	32
Figure A.1	– Appareil d'essai	38
Figure A.2	– Permittivité relative selon la fréquence (stratifié de Dk 3,8 et 0,51 mm d'épaisseur)	39
Figure A.3	– Tangente de perte selon la fréquence (stratifié de Dk 3,8 et 0,51 mm d'épaisseur)	39
Figure A.4	– Courbe de la permittivité relative et de la tangente de perte à températures variables (stratifié de Dk 3,8 et 0,51 mm d'épaisseur)	40
Figure B.1	– $K_{\varepsilon}(\varepsilon_r, h)$ selon la permittivité relative à différentes épaisseurs d'échantillon	41
Figure B.2	– Distribution du champ électrique du résonateur diélectrique fendu (vue latérale des résonateurs diélectriques)	42
Figure B.3	– Distribution du champ électrique du résonateur diélectrique fendu (vue de dessus entre les résonateurs diélectriques)	43
Figure B.4	– Valeurs de p_{es} selon la permittivité relative à différentes épaisseurs d'échantillon	43
Tableau 1	– Dimensions des éprouvettes	29
Tableau 2	– Paramètres de l'appareil d'essai SPDR	30
Tableau B.1	– Résultats des mesures de différents matériaux à l'aide d'un appareil SPDR de 10 GHz	42

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MÉTHODES D'ESSAI POUR LES MATÉRIAUX ÉLECTRIQUES, LES CARTES IMPRIMÉES ET AUTRES STRUCTURES D'INTERCONNEXION ET ENSEMBLES –

Partie 2-721: Méthodes d'essai des matériaux pour structures d'interconnexion – Mesure de la permittivité relative et de la tangente de perte pour les stratifiés recouverts de cuivre en hyperfréquences à l'aide d'un résonateur diélectrique en anneaux fendus

AVANT-PROPOS

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

La Norme Internationale IEC 61189-2-721 a été établie par le comité d'études 91 de l'IEC: Techniques d'assemblage des composants électroniques.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
91/1246/FDIS	91/1258/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.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 61189, publiées sous le titre général *Méthodes d'essai pour les matériaux électriques, les cartes imprimées et autres structures d'interconnexion et ensembles*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Les futures normes de cette série porteront dorénavant le nouveau titre général cité ci-dessus. Le titre des normes existant déjà dans cette série sera mis à jour lors de la prochaine édition.

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

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

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

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

MÉTHODES D'ESSAI POUR LES MATÉRIAUX ÉLECTRIQUES, LES CARTES IMPRIMÉES ET AUTRES STRUCTURES D'INTERCONNEXION ET ENSEMBLES –

Partie 2-721: Méthodes d'essai des matériaux pour structures d'interconnexion – Mesure de la permittivité relative et de la tangente de perte pour les stratifiés recouverts de cuivre en hyperfréquences à l'aide d'un résonateur diélectrique en anneaux fendus

1 Domaine d'application

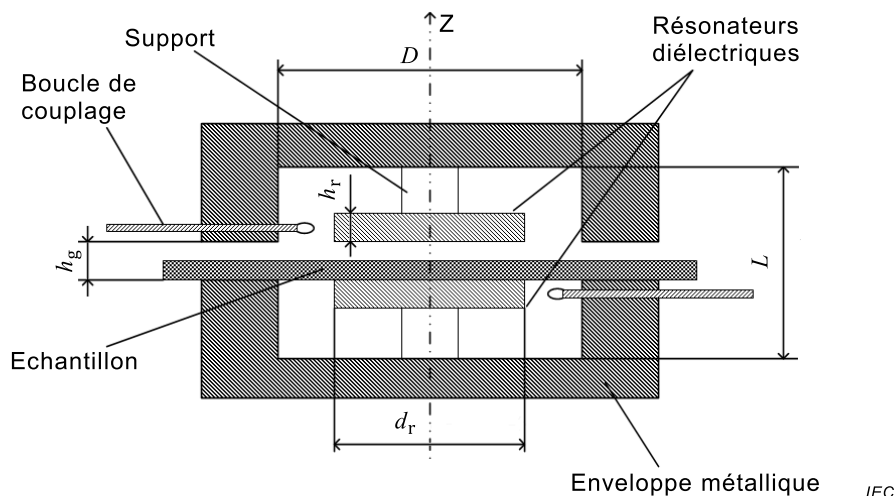
La présente partie de l'IEC 61189 présente un moyen de déterminer la permittivité relative (ϵ_r) et la tangente de perte ($\tan\delta$), également appelées constante diélectrique (Dk) et facteur de dissipation (Df) des stratifiés recouverts de cuivre en hyperfréquences (de 1,1 GHz à 20 GHz) à l'aide d'un résonateur diélectrique en anneaux fendus (SPDR).

La présente partie de l'IEC 61189 s'applique aux stratifiés recouverts de cuivre et aux matériaux de base diélectriques.

2 Epreuves

2.1 Taille des épreuves

La taille de l'éprouvette doit être supérieure au diamètre interne D des enveloppes métalliques et l'épaisseur maximale de l'éprouvette doit être inférieure à la distance h_g entre les enveloppes métalliques de l'appareil. (Voir Figure 1.)



Légende

- h_g distance entre les enveloppes métalliques de l'appareil;
- D diamètre interne des enveloppes métalliques;
- L hauteur interne des enveloppes métalliques;
- d_r diamètre du résonateur diélectrique;
- h_r épaisseur du résonateur diélectrique.

Figure 1 – Schéma de l'appareil d'essai SPDR

Trois éprouvettes sont exigées pour l'essai à température ambiante et une éprouvette est exigée pour l'essai à température variable pour chaque appareil d'essai SPDR dans le cadre de cet essai. Le Tableau 1 montre les dimensions des éprouvettes prises en charge.

Tableau 1 – Dimensions des éprouvettes

Fréquence nominale de l'appareil d'essai SPDR GHz	Tailles des éprouvettes prises en charge mm	Epaisseur maximale des éprouvettes mm
1,1	150 × 150	6,0
3	80 × 80	3,0
5 à 6	80 × 80	2,0
9 à 10	80 × 80	0,9
13 à 16	50 × 35	0,6
18 à 20	15 × 15	0,5

Si applicable, une taille d'éprouvette différente des dimensions spécifiées dans le Tableau 1 peut être utilisée. Par exemple, une éprouvette de 130 mm × 130 mm peut être utilisée pour une fréquence de 1,1 GHz.

2.2 Préparation

Le revêtement en cuivre doit être entièrement supprimé par gravure et les stratifiés recouverts de cuivre doivent être complètement nettoyés.

2.3 Marquage

Marquer chaque éprouvette dans le coin en haut à gauche à l'aide d'une pointe à graver ou d'une autre méthode appropriée.

2.4 Epaisseur

Dans les limites de l'appareil d'essai, plus l'éprouvette est épaisse, plus les erreurs de mesure sont réduites. Les éprouvettes minces peuvent être empilées à un minimum de 0,4 mm pour améliorer la précision de la mesure.

NOTE Les entrefers entre l'échantillon et l'appareil n'affectent pas la mesure.

3 Equipement/appareils

3.1 Généralités

Un diagramme des composants du système d'essai est donné à la Figure 2.

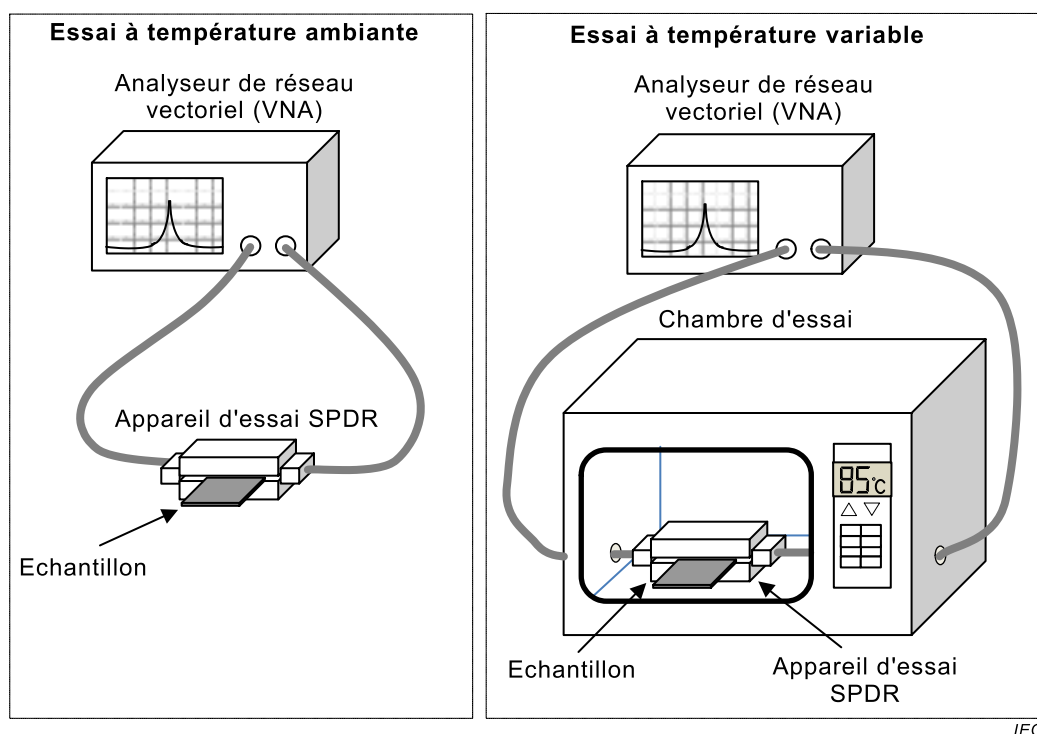


Figure 2 – Diagramme des composants du système d'essai

3.2 Analyseur de réseau vectoriel (VNA)

Les valeurs suivantes sont exigées:

- a) la plage de fréquences du VNA doit être comprise entre 500 MHz et 20 GHz;
- b) la plage dynamique du VNA doit être supérieure à 60 dB.

3.3 Appareil d'essai SPDR

3.3.1 Généralités

Un schéma de l'appareil d'essai SPDR est donné à la Figure 1.

3.3.2 Paramètres

Le Tableau 2 indique les relations types entre la fréquence nominale de l'appareil d'essai SPDR et h_g et D .

3.3.3 Fréquence

Pour réaliser des essais de fréquences différentes, utiliser la fréquence nominale correspondante de l'appareil d'essai SPDR.

Tableau 2 – Paramètres de l'appareil d'essai SPDR

Fréquence nominale de l'appareil d'essai SPDR GHz	D mm	h_g mm
1,1	120	6,0
3	50	3,0
5 à 6	30	2,0
9 à 10	22	0,9

Fréquence nominale de l'appareil d'essai SPDR GHz	D mm	h_g mm
13 à 16	15	0,6
18 à 20	10	0,5

3.4 Unité de vérification

L'unité de vérification comprend les éléments suivants:

- échantillon de référence normalisé, par exemple quartz monocristallin ou échantillon équivalent;
- ensemble d'étalonnage de VNA.

3.5 Micromètre

Micromètre d'une résolution de 0,001 mm (ou supérieure).

3.6 Four à chaleur tournante

Four à chaleur tournante avec une température stable de 105^{+5}_{-2} °C.

3.7 Chambre d'essai

Pour l'essai réalisé à température variable dans la chambre d'essai, les exigences suivantes s'appliquent:

- plages de température: -125 °C à $+110$ °C, autre plage de température si convenue entre l'utilisateur et le fournisseur;
- écart de température réelle toléré: ± 1 °C.

4 Procédure

4.1 Préconditionnement

Toutes les éprouvettes doivent être conditionnées à (23 ± 2) °C à une humidité relative de (50 ± 5) % pendant au moins 24 heures avant l'essai. Toutefois, si une éprouvette a été récemment gravée ou exposée à une humidité excessive, il convient de la faire sécher dans un four à chaleur tournante pendant 2 heures à une température de 105^{+5}_{-2} °C, puis de la conditionner selon les conditions mentionnées ci-dessus.

4.2 Essais de permittivité relative et de tangente de perte à température ambiante

4.2.1 Conditions d'essai

Il convient que la température ambiante d'essai soit de (23 ± 2) °C. Il convient que les variations ne dépassent pas 1 °C au cours de l'essai.

4.2.2 Préparation

Laisser le VNA se réchauffer pendant au moins 30 minutes pour stabiliser la température.

4.2.3 Appareil

Sélectionner un appareil d'essai SPDR conforme à la fréquence d'essai. La taille et l'épaisseur de l'éprouvette doivent respecter les exigences spécifiées au Tableau 1. Par exemple, si la fréquence d'essai est de 10 GHz, il convient de sélectionner un appareil

d'essai SPDR avec une fréquence nominale de 10 GHz. La taille d'éprouvette prise en charge est de 80 mm × 80 mm et l'épaisseur maximale est inférieure à 0,9 mm.

4.2.4 Connexion au VNA

Connecter l'appareil d'essai SPDR au VNA. L'appareil d'essai doit être maintenu à l'horizontale.

4.2.5 Paramètres du VNA

Se reporter aux instructions du fabricant et à la fréquence nominale de l'appareil SPDR pour définir les paramètres du VNA.

4.2.6 Fréquence et facteur de surtension sans éprouvette

Mesurer les valeurs de fréquence de résonance (f_0) et de facteur de surtension (Q_0) du résonateur à vide.

4.2.7 Micromètre

Utiliser un micromètre pour mesurer l'épaisseur de l'éprouvette, enregistrée comme h .

4.2.8 Réglage de l'éprouvette

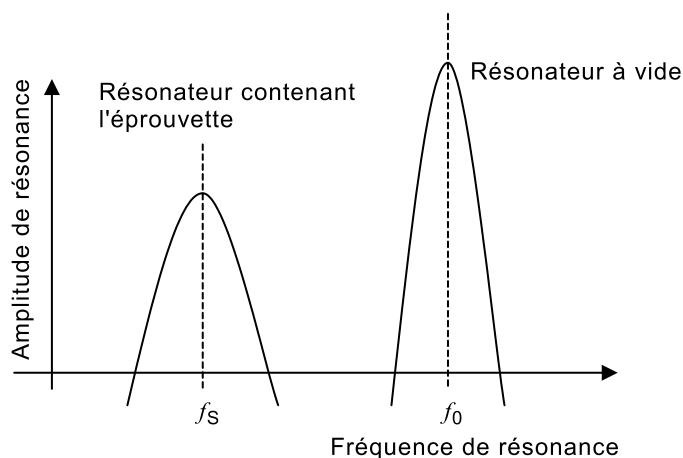
Insérer l'éprouvette dans l'appareil d'essai. La face comportant le marquage est tournée vers le haut et le bord de cette face doit être aligné au bord de l'appareil.

4.2.9 Fréquence et facteur de surtension avec éprouvette

Mesurer les valeurs de fréquence de résonance (f_s) et de facteur de surtension (Q_s) du résonateur contenant l'éprouvette.

4.2.10 Comparaison

Un schéma montrant le changement de fréquence de résonance avec ou sans éprouvette est présenté à la Figure 3.



IEC

Figure 3 – Schéma montrant le changement de fréquence de résonance avec ou sans éprouvette

4.2.11 Calcul

4.2.11.1 Généralités

Calcul de la permittivité relative et de la tangente de perte à température ambiante.

La permittivité relative et la tangente de perte à température ambiante doivent être calculées comme énoncé ci-après. Il convient d'utiliser le logiciel informatique procuré par le fournisseur d'équipement pour effectuer les calculs.

4.2.11.2 Permittivité relative

La permittivité relative (ε_r) doit être calculée à l'aide de l'Equation (1):

$$\varepsilon_r = 1 + \frac{f_0 - f_s}{hf_0 K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)} \quad (1)$$

où

ε_r est la permittivité relative;
 h est l'épaisseur de l'éprouvette soumise à l'essai, en mm;
 f_0 est la fréquence de résonance de l'appareil SPDR à vide;
 f_s est la fréquence de résonance du résonateur avec éprouvette diélectrique;
 $K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ est une fonction de ε_r et h . Pour une cavité résonante fixe, il convient d'identifier au préalable ses paramètres physiques (taille, ε_r des résonateurs diélectriques). $K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$ est précalculé et évalué par simulation de champs électromagnétiques à l'aide de la méthode Rayleigh-Ritz stricte. Placer dans l'Equation (1) les valeurs de fréquence SPDR à vide (f_0), de fréquence de résonance avec éprouvette diélectrique (f_s) et d'épaisseur de l'éprouvette (h) soumise à l'essai. Entrer une valeur arbitraire similaire à la permittivité relative de l'échantillon et utiliser un algorithme d'approximation successive. Après plusieurs itérations, arrêter le calcul lorsque l'erreur relative des deux dernières valeurs de permittivité relative calculées est inférieure à 0,1 %. La dernière donnée calculée est considérée comme valeur de la permittivité relative de l'éprouvette. Des informations complémentaires sont données à l'Annexe B.

4.2.11.3 Tangente de perte

La tangente de perte doit être calculée conformément à l'Equation (2):

$$\tan \delta = \frac{(Q_S^{-1} - Q_{DR}^{-1} - Q_C^{-1})}{p_{es}} \quad (2)$$

où

$\tan \delta$ est la tangente de perte;
 Q_S est le facteur de surtension à vide de l'appareil résonant contenant l'éprouvette;
 Q_C est le facteur de surtension dépendant des pertes métalliques pour l'appareil résonant contenant l'éprouvette;
 Q_{DR} est le facteur de surtension dépendant des pertes diélectriques dans les poteaux diélectriques pour l'appareil contenant l'éprouvette;
 p_{es} est le facteur de remplissage en énergie électromagnétique de l'éprouvette. Après avoir identifié les paramètres physiques de la cavité résonante, le facteur de remplissage en énergie électromagnétique p_{es} peut être déterminé par simulation de champs électromagnétiques. Pour une cavité résonante fixe, p_{es} est la valeur constante. Des informations complémentaires sont données à l'Annexe B.

4.2.12 Changement d'éprouvette

Mesurer les deux autres éprouvettes en répétant les étapes 4.2.6 à 4.2.11.

4.2.13 Changement de fréquence d'essai

Si une autre fréquence d'essai est sélectionnée, changer d'appareil d'essai SPDR conformément à la fréquence d'essai. Puis répéter les étapes 4.2.3 à 4.2.12.

4.3 Essais de permittivité relative et de tangente de perte à température variable

4.3.1 Conditions d'essai

Il convient que la température ambiante d'essai soit de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Il convient que les variations ne dépassent pas $1 ^\circ\text{C}$ au cours de l'essai.

4.3.2 Préparation

Laisser le VNA se réchauffer pendant au moins 30 minutes.

4.3.3 Appareil

Sélectionner un appareil d'essai SPDR conforme à la fréquence d'essai. La taille et l'épaisseur de l'éprouvette doivent respecter les exigences spécifiées au Tableau 1. Par exemple, si la fréquence d'essai est de 10 GHz, il convient de sélectionner un appareil d'essai SPDR avec une fréquence nominale de 10 GHz. La taille d'éprouvette prise en charge est de 80 mm × 80 mm et l'épaisseur maximale est inférieure à 0,9 mm.

4.3.4 Connexion au VNA

Connecter l'appareil d'essai SPDR au VNA. L'appareil d'essai doit être maintenu à l'horizontale dans la chambre d'essai.

4.3.5 Paramètres du VNA

Se reporter aux instructions du fabricant et à la fréquence nominale de l'appareil SPDR pour définir les paramètres du VNA.

4.3.6 Température de la chambre d'essai

Régler la température d'essai de la chambre d'essai. Une fois la température d'essai (T) atteinte, la maintenir pendant au moins 15 min.

4.3.7 Fréquence et facteur de surtension sans éprouvette

Mesurer les valeurs de fréquence de résonance $f_0(T)$ et de facteur de surtension $Q_0(T)$ du résonateur à vide.

Il convient que la crête de résonance se situe entre -40 dB et -45 dB. Tout en la maintenant symétrique, ajuster la position des boucles de couplage pour atteindre une valeur appartenant à cet intervalle.

Lors de la mesure du facteur de surtension, il convient d'ajuster la plage de fréquences du VNA afin qu'elle soit comprise entre 110 % et 200 % de la largeur totale à la moitié de la valeur maximale de la courbe de résonance.

4.3.8 Micromètre

Utiliser un micromètre pour mesurer l'épaisseur de l'éprouvette, et enregistrer comme h .

4.3.9 Réglage de l'éprouvette

La chambre d'essai doit revenir à température ambiante. Insérer l'éprouvette dans l'appareil d'essai. La face comportant le marquage est tournée vers le haut et le bord de cette face doit être aligné au bord de l'appareil.

4.3.10 Fréquence et facteur de surtension avec éprouvette

Répéter l'étape 4.3.6. Mesurer les valeurs de fréquence de résonance $f_s(T)$ et de facteur de surtension $Q_s(T)$ du résonateur contenant l'éprouvette à la température T .

Lors de la mesure du facteur de surtension, il convient d'ajuster la plage de fréquences du VNA afin qu'elle soit comprise entre 110 % et 200 % de la largeur totale à la moitié de la valeur maximale de la courbe de résonance.

4.3.11 Calcul

Suivre l'étape 4.2.11, à savoir calculer la permittivité relative $Dk(T)$ et la tangente de perte $Df(T)$ à la température T .

4.3.12 Options

Si une autre température d'essai est sélectionnée, répéter les étapes 4.3.6 à 4.3.11.

4.3.13 Coefficient thermique

4.3.13.1 Généralités

Coefficient thermique de la permittivité relative et coefficient thermique de la tangente de perte.

4.3.13.2 Permittivité relative

Le coefficient thermique de la permittivité relative ε_r (forme raccourcie de $TC\varepsilon_r$) correspond au taux de variation de la permittivité relative en cas de changement de température. L'unité de $TC\varepsilon_r$ est $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. En règle générale, la permittivité relative d'une éprouvette à sa température de référence T_{ref} de 23°C est utilisée comme permittivité relative de référence $Dk(T_{\text{ref}})$. Pour la température T , $TC\varepsilon_r$ doit être calculé conformément à l'Equation (3):

$$TC\varepsilon_r = \frac{Dk(T) - Dk(T_{\text{ref}})}{(T - T_{\text{ref}}) \times Dk(T_{\text{ref}})} \quad (3)$$

où

$TC\varepsilon_r$ est le coefficient thermique de ε_r , en $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;

T est la température d'essai, en $^{\circ}\text{C}$;

T_{ref} est la température de référence, en $^{\circ}\text{C}$;

$Dk(T)$ est la permittivité relative à la température T ;

$Dk(T_{\text{ref}})$ est la permittivité relative à la température T_{ref} .

4.3.13.3 Tangente de perte

Le coefficient thermique de $\tan\delta$ ($TC \tan\delta$) correspond au taux de variation de la tangente de perte en cas de changement de température (pour 1°C de plus ou de moins). L'unité de $TC \tan\delta$ est $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. En règle générale, la tangente de perte d'une éprouvette à la température de référence T_{ref} de 23°C est utilisée comme tangente de perte de référence $Df(T_{\text{ref}})$. Pour une température T , $TC \tan\delta$ est calculé conformément à l'Equation (4).

$$TC \tan \delta = \frac{Df(T) - Df(T_{\text{ref}})}{(T - T_{\text{ref}}) \times Df(T_{\text{ref}})} \quad (4)$$

où

$TC \tan \delta$ est le coefficient thermique de $\tan \delta$, en ppm/°C;

T est la température d'essai, en °C;

T_{ref} est la température de référence, en °C;

$Df(T)$ est la tangente de perte à la température T ;

$Df(T_{\text{ref}})$ est la tangente de perte à la température T_{ref} .

4.3.14 Changement de fréquence d'essai

Si une autre fréquence d'essai est sélectionnée, changer d'appareil d'essai SPDR conformément à la fréquence d'essai. Puis répéter les étapes 4.3.3 à 4.3.13.

5 Rapport

5.1 A température ambiante

Pour les essais à température ambiante, mettre les éléments suivants dans le rapport:

- environnement d'essai (température, humidité);
- fréquence d'essai;
- valeurs et valeurs moyennes de la permittivité relative et tangente de perte à la fréquence d'essai;
- préconditionnement de l'éprouvette;
- toute anomalie au cours de l'essai ou toute variation par rapport à la présente méthode d'essai.

5.2 A température variable

Pour les essais à température variable, mettre les éléments suivants dans le rapport:

- température d'essai (T) et température de référence (T_{ref});
- fréquence d'essai;
- $Dk(T)$ et $Df(T)$ à température d'essai (T);
- $TC\varepsilon_r$ et $TC \tan \delta$;
- $Dk(T_{\text{ref}})$ et $Df(T_{\text{ref}})$;
- si plusieurs températures d'essai sont utilisées, indiquer le diagramme en courbes de permittivité relative et de tangente de perte conformément aux variations de température;
- préconditionnement de l'éprouvette;
- toute anomalie au cours de l'essai ou toute variation par rapport à la présente méthode d'essai.

6 Informations complémentaires

6.1 Précision

Précision des mesures d'un échantillon d'épaisseur h .

Mesure de la permittivité: $\Delta\varepsilon/\varepsilon = \pm(0,0015 + \Delta h/h)$.

Tangente de perte: $\Delta \tan \delta = \pm 2 \times 10^{-5}$ ou $\pm 0,03 \tan \delta$, la valeur la plus élevée étant celle à utiliser.

6.2 Maintenance

Nettoyer régulièrement les têtes d'essai, les matériaux normalisés et les appareils.

6.3 Éléments à prendre en compte

Pour éviter d'endommager l'appareil d'essai lors des essais à température variable, vérifier régulièrement le système d'essai à l'aide d'un échantillon de référence normalisé. Par exemple, le quartz monocristallin est utilisé comme échantillon de référence normalisé d'une épaisseur de 0,4 mm. L'écart de la mesure de la permittivité relative entre le résultat d'essai et la valeur nominale de l'échantillon de référence normalisé doit être inférieur à $\pm 0,7 \%$, et l'écart de la mesure de la tangente de perte doit être inférieur à $\pm 2 \times 10^{-5}$.

6.4 Informations complémentaires relatives aux appareils et aux résultats

Un exemple d'appareil d'essai et de résultats d'essai est donné à l'Annexe A.

6.5 Informations complémentaires relatives à $K_{\varepsilon}(\varepsilon_r, h)$ et p_{es}

Des informations complémentaires relatives à $K_{\varepsilon}(\varepsilon_r, h)$ et p_{es} sont données à l'Annexe B.

Annexe A (informative)

Exemple d'appareil d'essai et de résultats d'essai

A.1 Exemple d'appareil d'essai

La Figure A.1 fournit une photo d'un appareil SPDR de 5 GHz. Utiliser un adaptateur femelle / femelle de 3,5 mm pour connecter le câble coaxial et l'appareil d'essai SPDR.

Un appareil SPDR est doté d'une boucle de couplage à ses deux extrémités afin d'ajuster le coefficient de couplage. L'épaisseur maximale de l'éprouvette est de 2 mm pour cet appareil.

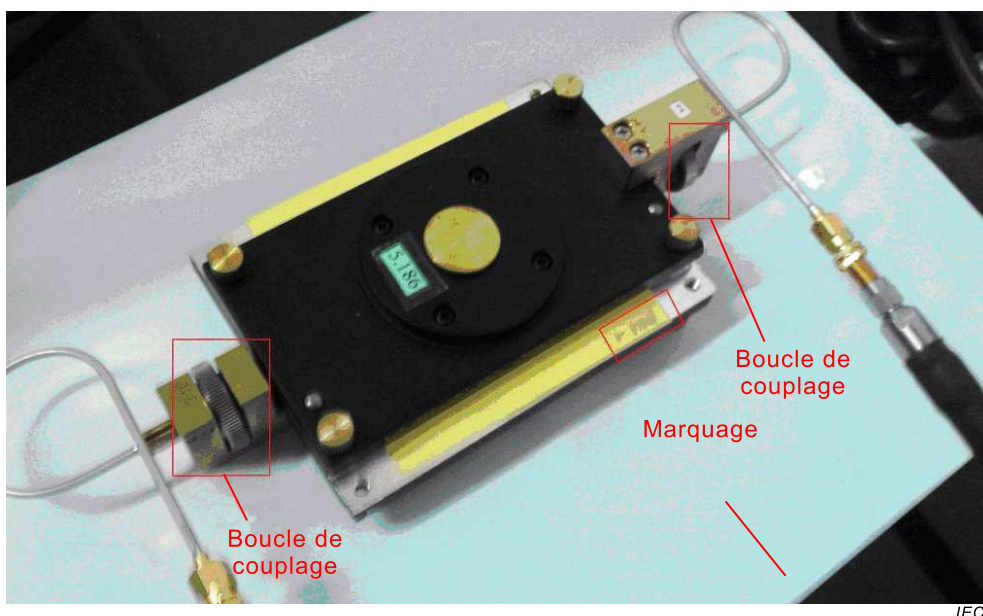


Figure A.1 – Appareil d'essai

A.2 Exemple de résultats d'essai

La Figure A.2 et la Figure A.3 illustrent la mesure type de la permittivité relative et de la tangente de perte en hyperfréquences (entre 1,1 GHz et 19 GHz) pour un stratifié recouvert de cuivre d'une permittivité relative (ϵ_r) de 3,8. La Figure A.4 montre un diagramme en courbes de la permittivité relative et de la tangente de perte à des températures variables (entre -125 °C et 110 °C) pour un stratifié recouvert de cuivre d'une permittivité relative (ϵ_r) de 3,8.

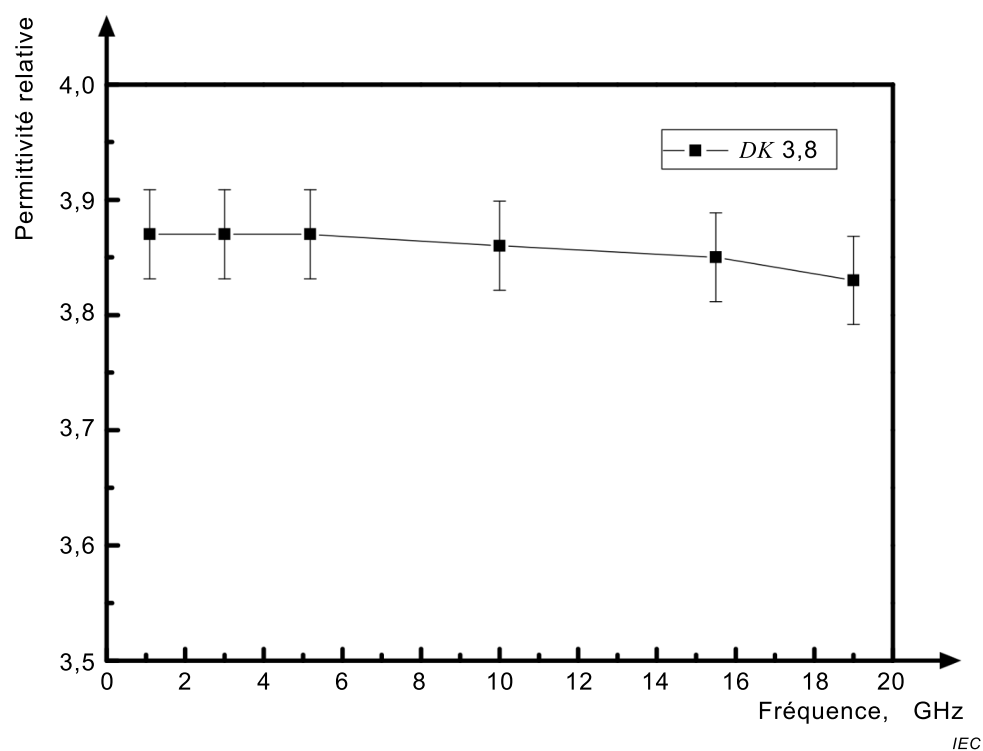


Figure A.2 – Permittivité relative selon la fréquence
(stratifié de Dk 3,8 et 0,51 mm d'épaisseur)

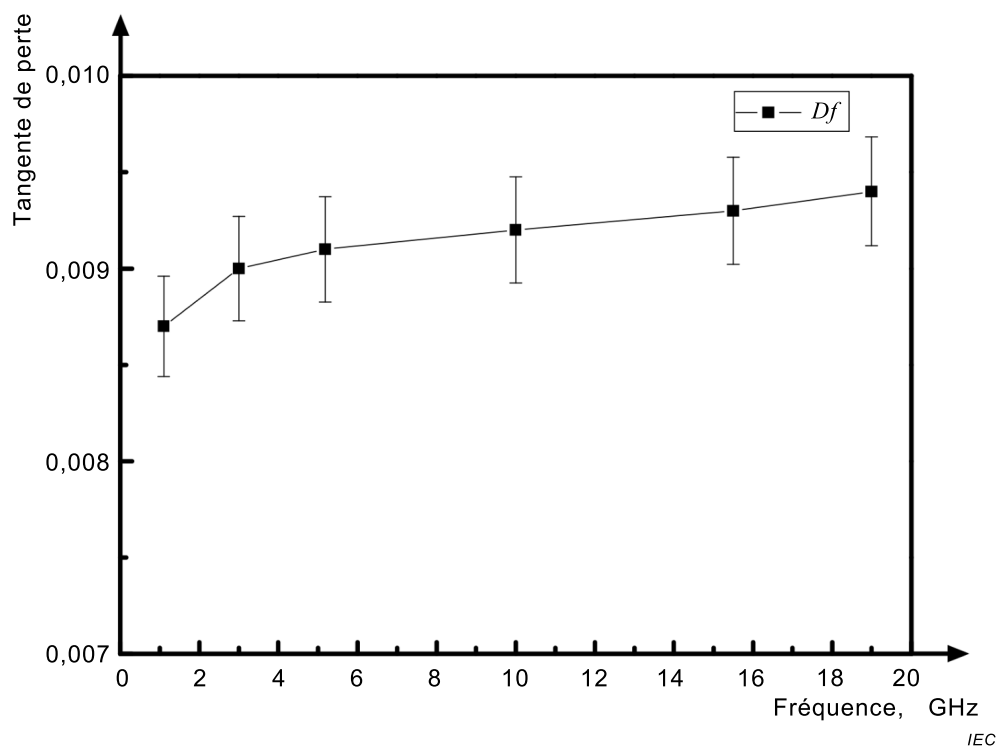
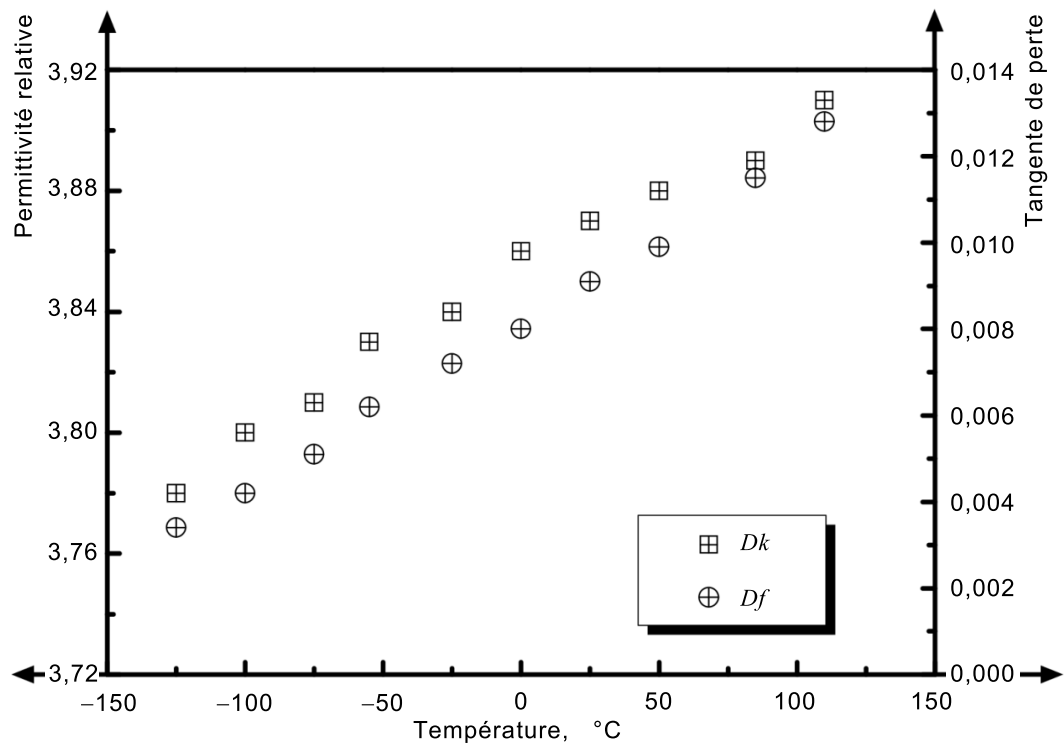


Figure A.3 – Tangente de perte selon la fréquence
(stratifié de Dk 3,8 et 0,51 mm d'épaisseur)



IEC

Figure A.4 – Courbe de la permittivité relative et de la tangente de perte à températures variables (stratifié de D_k 3,8 et 0,51 mm d'épaisseur)

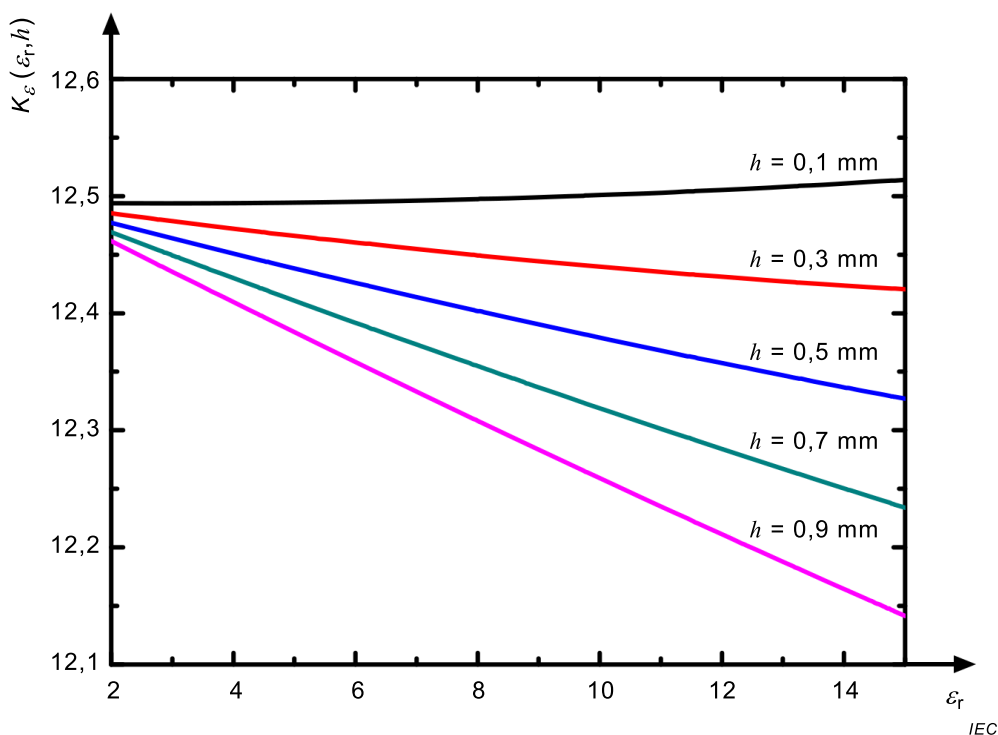
Annexe B (informative)

Informations complémentaires relatives à $K_{\varepsilon}(\varepsilon_r, h)$ et p_{es}

Par définition, les valeurs de la fonction $K_{\varepsilon}(\varepsilon_r, h)$ sont déterminées pour un appareil résonant spécifique et des valeurs fixes ε_r et h , comme indiqué ci-dessous:

$$K_{\varepsilon}(\varepsilon_r, h) = \frac{f_0 - f_s}{(\varepsilon_r - 1)hf_0} \quad (\text{B.1})$$

La fonction $K_{\varepsilon}(\varepsilon_r, h)$ est calculée et donne lieu à un tableau pour chaque appareil SPDR. Les fréquences de résonance exactes et les valeurs résultantes de $K_{\varepsilon}(\varepsilon_r, h)$ sont calculées pour un nombre de ε_r et de h , puis notées sous forme de tableau. L'interpolation a été utilisée pour calculer $K_{\varepsilon}(\varepsilon_r, h)$ pour toutes les autres valeurs de ε_r et h . La valeur initiale de $K_{\varepsilon}(\varepsilon_r, h)$ dans l'évaluation de la permittivité à l'aide de l'Equation (1) est prise en compte comme valeur identique correspondante pour une valeur h donnée et $\varepsilon_r = 1$. Les valeurs suivantes de $K_{\varepsilon}(\varepsilon_r, h)$ sont déterminées pour les valeurs constantes diélectriques suivantes obtenues lors de la procédure itérative. Etant donné que $K_{\varepsilon}(\varepsilon_r, h)$ est une fonction de ε_r et h qui varie lentement, les itérations à l'aide de l'Equation (1) convergent rapidement. La Figure B.1 illustre la valeur $K_{\varepsilon}(\varepsilon_r, h)$ selon la permittivité relative à différentes épaisseurs d'échantillon pour un appareil SPDR de 10 GHz.



**Figure B.1 – $K_{\varepsilon}(\varepsilon_r, h)$ selon la permittivité relative
à différentes épaisseurs d'échantillon**

Par définition, la valeur de p_{es} est déterminée pour un appareil résonant spécifique et des valeurs fixes ε_r et h , comme indiqué ci-dessous:

$$p_{\text{es}} = h\varepsilon_r'K_1(\varepsilon_r', h) \quad (\text{B.2})$$

où

ε'_r est la permittivité relative;

h est l'épaisseur de l'éprouvette, en mm;

$K_I(\varepsilon'_r, h)$ est une fonction de ε'_r et h .

La méthode Rayleigh-Ritz permet de calculer la valeur de p_{es} pour une structure résonante spécifique. Ces paramètres ont été calculés pour un nombre de h et de ε'_r .

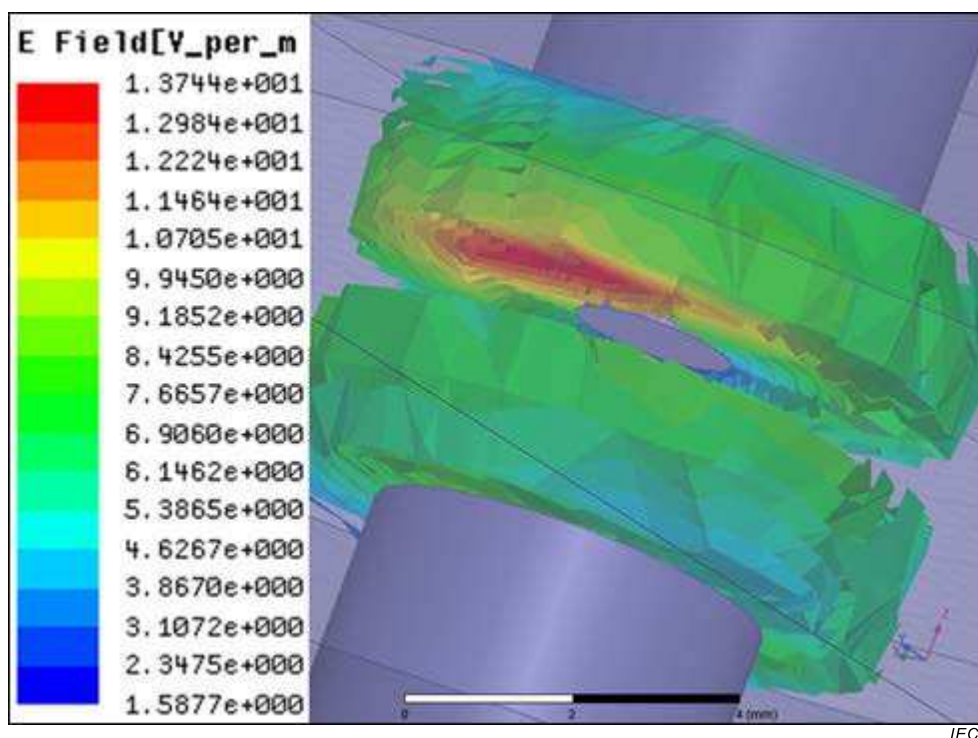
Pour un appareil SPDR de 10 GHz avec une structure résonante $D = 16,5$ mm, $L = 9$ mm, $d_r = 8$ mm, $h_r = 1$ mm, $h_g = 1$ mm et une permittivité relative de résonateur diélectrique de 38, la distribution du composant de champ électrique E dans le résonateur diélectrique fendu fonctionnant à une fréquence nominale (sans échantillon) de 10 GHz est indiquée à la Figure B.2 et à la Figure B.3.

La Figure B.4 présente des valeurs de p_{es} selon la permittivité relative à différentes épaisseurs d'échantillon.

Pour un appareil SPDR de 10 GHz avec différents échantillons, les paramètres sont fournis au Tableau B.1.

**Tableau B.1 – Résultats des mesures de différents matériaux
à l'aide d'un appareil SPDR de 10 GHz**

Dk	Df	Epaisseur mm	p_{es}	$K_\varepsilon(\varepsilon_r, h)$	Q_c	Q_{DR}	Matériau
2,05	0,000 3	0,3	$8,3 \times 10^{-4}$	12,477	$> 10^5$	16 000	PTFE
3,0	0,003 0	0,3	$1,2 \times 10^{-3}$	12,412	$> 10^5$	16 000	FR4 à faible Dk
3,8	0,009 0	0,3	3×10^{-3}	12,364	$> 10^5$	16 000	FR4 à faible perte
4,5	0,015 0	0,3	$4,2 \times 10^{-3}$	12,332	$> 10^5$	16 000	FR4 sans halogène



**Figure B.2 – Distribution du champ électrique du résonateur
diélectrique fendu (vue latérale des résonateurs diélectriques)**

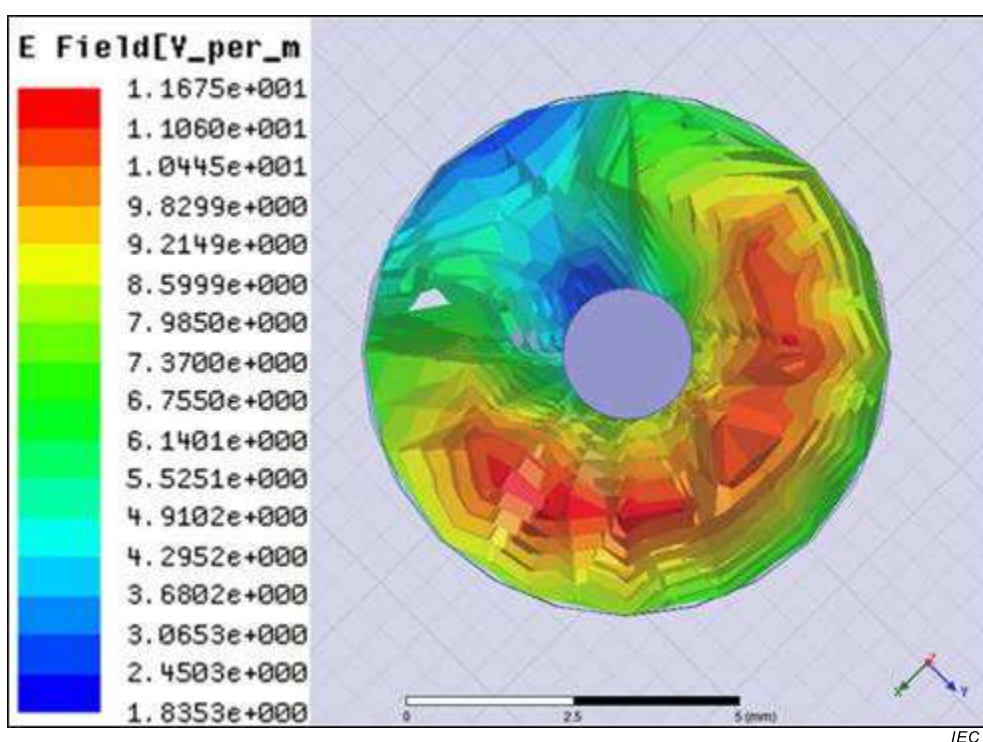


Figure B.3 – Distribution du champ électrique du résonateur diélectrique fendu (vue de dessus entre les résonateurs diélectriques)

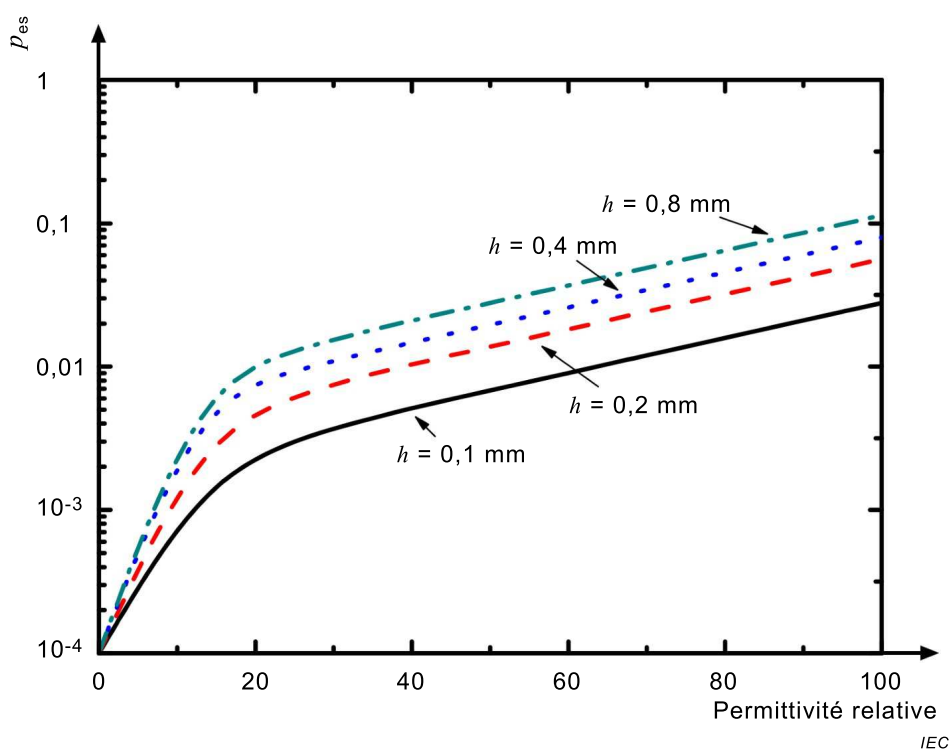


Figure B.4 – Valeurs de p_{es} selon la permittivité relative à différentes épaisseurs d'échantillon

Bibliographie

- [1] Nishikawa, T.; Wakino, K.; Tanaka, H.; Ishikawa, Y., *"Dielectric Resonator Method for Nondestructive Measurement of Complex Permittivity of Microwave Dielectric Substrates"*, Microwave Conference, 1990. 20th European, vol.1, pp.501-506, 1990
- [2] Mazierska, J.; Krupka, J.; Jacob, M.V.; Ledenyov, D., *"Complex permittivity measurements at variable temperatures of low loss dielectric substrates employing split post and single post dielectric resonators"*, Microwave Symposium Digest, 2004 IEEE MTT-S International, vol.3, pp.1825-1828, 2004
- [3] Mazierska, J.; Jacob, Mohan V.; Harring, A.; Krupka, J.; Barnwell, P.; Sims, T., *"Measurements of loss tangent and relative permittivity of LTCC ceramics at varying temperatures and frequencies"*, Journal of the European Ceramic Society, vol. 23, issue 14, pp.2611–2615, 2003
- [4] Krupka, J.; Clarke, R.N.; Rochard, O.C.; Gregory, A.P., *"Split post dielectric resonator technique for precise measurements of laminar dielectric specimens-measurement uncertainties"*, Microwaves, Radar and Wireless Communications, 2000. MIKON-2000. 13th International Conference, vol.1, pp.305-308, 2000
- [5] Krupka, J.; Gregory, A.P.; Rochard, O.C.; Clarke, R.N.; Riddle, B.; Baker-Jarvis, J., *"Uncertainty of complex permittivity measurements by split-post dielectric resonator technique"*, Journal of the European Ceramic Society, vol. 21, issue 15, pp.2673-2676, 2001
- [6] Krupka, J.; Geyer, R. G.; Baker-Jarvis, J.; Ceremuga, J., *"Measurements of the complex permittivity of microwave circuit board substrates using split dielectric resonator and reentrant cavity techniques"*, Seventh International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications, (Conf. Publ. No. 430), pp. 21-24, 1996

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