

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Waveguide type dielectric resonators –
Part 1-5: General information and test conditions – Measurement method of
conductivity at interface between conductor layer and dielectric substrate at
microwave frequency**

**Résonateurs diélectriques à modes guidés –
Partie 1-5: Informations générales et conditions d'essais – Méthode de mesure
de la conductivité au niveau de l'interface entre une couche conductrice et un
substrat diélectrique fonctionnant aux hyperfréquences**



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

**Waveguide type dielectric resonators –
Part 1-5: General information and test conditions – Measurement method of
conductivity at interface between conductor layer and dielectric substrate at
microwave frequency**

**Résonateurs diélectriques à modes guidés –
Partie 1-5: Informations générales et conditions d'essais – Méthode de mesure
de la conductivité au niveau de l'interface entre une couche conductrice et un
substrat diélectrique fonctionnant aux hyperfréquences**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 31.140

ISBN 978-2-8322-2721-3

**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.....	3
INTRODUCTION.....	5
1 Scope.....	6
2 Normative references.....	6
3 Measurement and related parameters	6
4 Calculation equations for R_i and σ_i	8
5 Preparation of specimen	12
6 Measurement equipment and apparatus	12
6.1 Measurement equipment	12
6.2 Measurement apparatus.....	12
7 Measurement procedure	13
7.1 Set-up of measurement equipment and apparatus.....	13
7.2 Measurement of reference level.....	13
7.3 Measurement procedure of Q_U	13
7.4 Determination of σ_i and measurement uncertainty	15
8 Example of measurement result.....	15
Annex A (informative) Derivation of Equation (4) for R_i	17
Annex B (informative) Calculation uncertainty of parameters in Figure 3	19
Bibliography	20
Figure 1 – Surface resistance R_S , surface conductivity σ_S , interface resistance R_i , and interface conductivity σ_i	7
Figure 2 – TE _{01δ} mode dielectric rod resonator to measure σ_i	8
Figure 3 – Parameters chart of f_0 , g , P_{rod} and P_{sub} for reference sapphire rod.....	10
Figure 4 – Parameters chart of f_0 , g , P_{rod} and P_{sub} for reference (Zr,Sn)TiO ₄ rod.....	11
Figure 5 – Schematic diagram of measurement equipments.....	12
Figure 6 – Schematic diagram of measurement apparatus for σ_i	13
Figure 7 – Frequency response for reference sapphire rod with two dielectric substrates as shown in Figure 2.....	14
Figure 8 – Resonance frequency f_0 , insertion attenuation IA_{0-} and half-power band width f_{BW}	15
Table 1 – Specifications of reference rods.....	9
Table 2 – ε'_{rod} and $\tan\delta_{rod}$ of reference rods measured by the method of IEC 61338-1-3	15
Table 3 – ε'_{sub} and $\tan\delta_{sub}$ of an LTCC test substrate measured by the method of IEC 62562	16
Table 4 – Measurement results of σ_i and σ_{ri} of a copper layer in LTCC substrate.....	16
Table B 1 – Parameters obtained by FEM and rigorous analysis of IEC 61338-1-3 for the TE ₀₁₁ mode resonator	19
Table B.2 – Calculated parameters f_0 , g , P_{rod} , P_{sub} , R_i , σ_i and σ_{ri} for the TE _{01δ} mode resonator.....	19

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

WAVEGUIDE TYPE DIELECTRIC RESONATORS –**Part 1-5: General information and test conditions –
Measurement method of conductivity at interface between
conductor layer and dielectric substrate at microwave frequency**

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.

International Standard IEC 61338-1-5 has been prepared by IEC technical committee 49: Piezoelectric, dielectric and electrostatic devices and associated materials for frequency control, selection and detection.

This first edition cancels and replaces IEC PAS 61338-1-5 published in 2010.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition:

- a) description of technical content related to patents (Japanese patent numbers JP3634966, JP3735501) in the Introduction;
- b) changes to normative references;
- c) addition to bibliography.

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

CDV	Report on voting
49/1089/CDV	49/1103/RVC

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

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

A list of all parts in the IEC 61338 series, published under the general title *Waveguide type dielectric resonators*, 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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61338-1-5:2015

INTRODUCTION

IEC 61338 consists of the following parts, under the general title *Waveguide type dielectric resonators*:

- Part 1: Generic specification
- Part 1-3: General information and test conditions – Measurement method of complex relative permittivity for dielectric resonator materials at microwave frequency
- Part 1-4: General information and test conditions – Measurement method of complex relative permittivity for dielectric resonator materials at millimeter-wave frequency
- Part 2: Guidelines for oscillator and filter applications
- Part 4: Sectional specification
- Part 4-1: Blank detail specification

The International Electrotechnical Commission (IEC) draws attention to the fact that it is claimed that compliance with this document may involve the use of a patent concerning:

- The use of a TE_{010} mode dielectric rod resonator for the interface resistance and the interface conductivity measurement, given in Clause 4;
- The use of a substrate/conductor/substrate layer structure, where a conductor is formed between two dielectric substrates, for the interface resistance and interface conductivity measurement, given in Clause 5.

IEC takes no position concerning the evidence, validity and scope of this patent right.

The holder of this patent right has assured the IEC that he/she is willing to negotiate licences under reasonable and non-discriminatory terms and conditions with applicants throughout the world. In this respect, the statement of the holder of this patent right is registered with IEC. Information may be obtained from:

KYOCERA Corporation

6 Takeda Tobadono-cho, Fushimiku, Kyoto 612-8501, Japan

Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this standard may be the subject of patent rights other than those identified above. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

ISO (www.iso.org/patents) and IEC (<http://patents.iec.ch>) maintain on-line data bases of patents relevant to their standards. Users are encouraged to consult the data bases for the most up to date information concerning patents.

WAVEGUIDE TYPE DIELECTRIC RESONATORS –

Part 1-5: General information and test conditions – Measurement method of conductivity at interface between conductor layer and dielectric substrate at microwave frequency

1 Scope

Microwave circuits are popularly formed on multi-layered organic or non-organic substrates. In the microwave circuits, the attenuation of planar transmission lines such as striplines, microstrip lines, and coplanar lines are determined by their conductor loss, dielectric loss and radiation loss. Among them, the conductor loss is a major factor in the attenuation of the planar transmission lines. A new measurement method is standardized in this document to evaluate the conductivity of transmission line on or in the substrates such as the organic, ceramic and LTCC (low temperature co-fired ceramics) substrates. This standard describes a measurement method for resistance and effective conductivity at the interface between conductor layer and dielectric substrate, which are called interface resistance and interface conductivity.

This measurement method has the following characteristics:

- the interface resistance R_i is obtained by measuring the resonant frequency f_0 and unloaded quality factor Q_u of a $TE_{01\delta}$ mode dielectric rod resonator shown in Figure 2;
- the interface conductivity σ_i and the relative interface conductivity $\sigma_{ri} = \sigma_i / \sigma_0$ are calculated from the measured R_i value, where $\sigma_0 = 5,8 \times 10^7$ S/m is the conductivity of standard copper;
- the measurement uncertainty of σ_{ri} ($\Delta\sigma_{ri}$) is less than 5 %.

2 Normative references

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

IEC 61338-1-3: *Waveguide type dielectric resonators – Part 1-3: General information and test conditions – Measurement method of complex relative permittivity for dielectric resonator materials at microwave frequency*

IEC 62562: *Cavity resonator method to measure the complex permittivity of low-loss dielectric plates*

3 Measurement and related parameters

The IEC 61338-1-3 described the measurement method for the surface resistance R_s and effective conductivity σ on the surface of the conductor. The term σ is designated as σ_s in this standard, and is called surface conductivity (Figure 1). This standard describes a measurement method for resistance and effective conductivity at the interface between conductor layer and dielectric substrate designated as R_i and σ_i respectively, and are called interface resistance and interface conductivity.

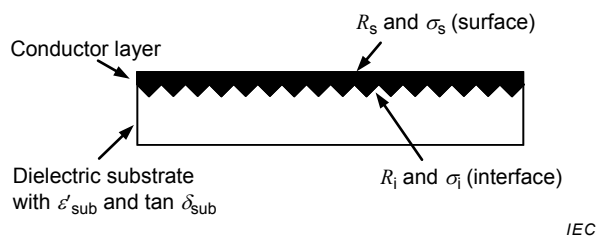


Figure 1 – Surface resistance R_s , surface conductivity σ_s , interface resistance R_i , and interface conductivity σ_i .

For the transmission line in the substrates, the electric current is concentrated at the interface between conductor layer and dielectric substrate, because the skin depth δ in the conductor is the order of μm in thickness at the microwave frequencies. In microstrip lines, the current is concentrated at the interface, rather than at the open face of the conductor. Furthermore, in copper-clad organic substrates, the interface side of the copper foil has rugged structure to hold the strong adhesive strength. In LTCC substrates, the interface between the conductor and ceramics has a rough structure, depending on the co-firing process and the material compositions. The conductor loss depends on the interface conditions. Therefore, the evaluation of R_i and σ_i is important to design microwave circuit and to improve the conductor fabrication process.

The relationship between R_s and σ_s is given by

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu}{\sigma_s}}, \quad \sigma_s = \sigma_{rs} \sigma_0 \quad (1)$$

where

- R_s is the surface resistance;
- f_0 is the resonance frequency;
- μ is the permeability of the conductor;
- σ_s is the surface conductivity;
- σ_{rs} is the relative surface conductivity.

Particularly, μ equals μ_0 ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$) for nonmagnetic conductors such as copper and silver.

The relationship between R_i and σ_i is given by

$$R_i = \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu}{\sigma_i}}, \quad \sigma_i = \sigma_{ri} \sigma_0 \quad (2)$$

where

- R_i is the interface resistance;
- σ_i is the interface conductivity;
- σ_{ri} is the relative interface conductivity.

The skin depth δ is given by

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad (3)$$

where

- f is the frequency;
- σ is the conductivity of the conductor.

To obtain high accuracy in this measurement method, the relative interface conductivity σ_{ri} of the conductor is preferable to be higher than 5%, and the thickness of conductor to be three times greater than skin depth δ . The measurement frequencies are limited to be 5 GHz and 13 GHz because of the reference dielectric rods used in this standard.

4 Calculation equations for R_i and σ_i

Figure 2 shows the structure of a $TE_{01\delta}$ mode dielectric rod resonator for the R_i measurement. The resonator consists of a dielectric rod and a pair of dielectric substrates with a conductor layer at one side. The dielectric rod has diameter d , height h , relative permittivity ϵ'_{rod} , and loss tangent $\tan\delta_{rod}$. The pair of dielectric substrates have the same values of diameter d' , thickness t , relative permittivity ϵ'_{sub} , and loss tangent $\tan\delta_{sub}$. To suppress the radiation loss, the diameter d' shall be three times greater than d . The conductor layers on each dielectric substrate are supposed to have the same value of R_i .

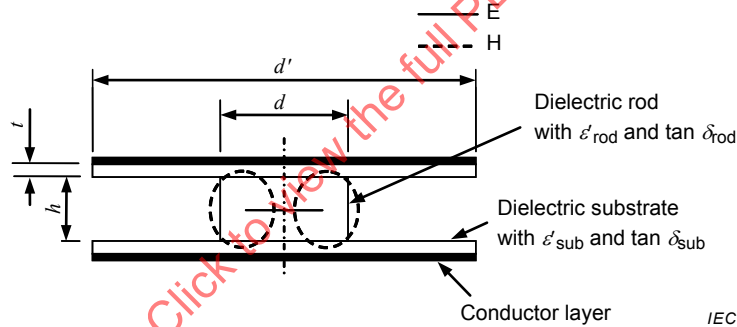


Figure 2 – $TE_{01\delta}$ mode dielectric rod resonator to measure σ_i .

In this structure, the conductive loss of the $TE_{01\delta}$ mode resonator is caused by the interface resistance R_i . The value of $1/Q_u$ is given by a sum of power losses due to R_i , $\tan\delta_{rod}$ and $\tan\delta_{sub}$:

$$\frac{1}{Q_u} = \frac{R_i}{g} + P_{rod} \tan\delta_{rod} + P_{sub} \tan\delta_{sub} , \quad (4)$$

where

- g is the geometric factor of the resonator (Ω);
- P_{rod} is the partial electric energy filling factor of the dielectric rod;
- P_{sub} is the partial electric energy filling factor of the dielectric substrate.

The equation for R_i is derived from Equation (4):

$$R_i = g \left(\frac{1}{Q_u} - P_{rod} \tan\delta_{rod} - P_{sub} \tan\delta_{sub} \right) \quad (5)$$

The value σ_i is calculated from this R_i value by Equation (2).

The derivation of Equation (4) is given in Annex A, together with definitions of the parameters g , P_{rod} and P_{sub} . These parameters for the $\text{TE}_{01\delta}$ mode resonator can be calculated by using the FEM or the mode matching method. However, the calculation requires complicated and tedious works. To make the treatment simple and easy, this standard recommends to use the graphical charts that are prepared for the parameters of reference dielectric rod resonators; a sapphire single crystal and a $(\text{Zr},\text{Sn})\text{TiO}_4$ ceramic (Table 1). The axis of sapphire rod should be parallel to the c -axis within 0,3 degree. The $(\text{Zr},\text{Sn})\text{TiO}_4$ ceramic rod is provided from the Japan fine ceramics center. The parameters f_0 , g , P_{rod} and P_{sub} for the reference rods were calculated by an FEM analyzed in cylindrical coordinate and are shown in Figures 3 and 4 graphically. The calculation uncertainty on the parameters is shown in Annex B.

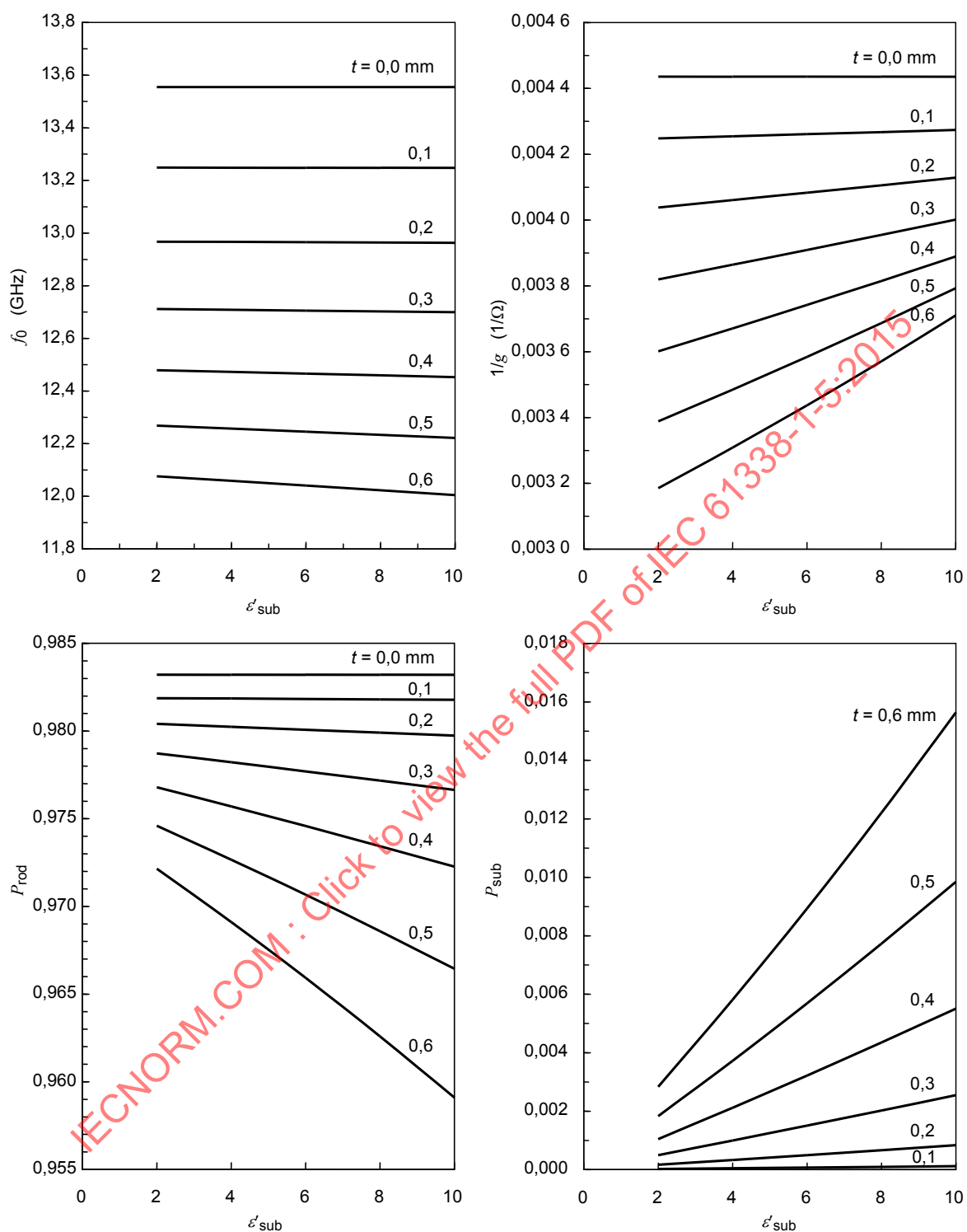
To calculate the R_i in Equation (5), the complex permittivity values of the dielectric rod and the substrate are necessary to be given in advance. IEC 61338-1-3 shall be used to measure the values of $\varepsilon'_{\text{rod}}$ and $\tan\delta_{\text{rod}}$. IEC 62562 shall be used to measure the values of $\varepsilon'_{\text{sub}}$ and $\tan\delta_{\text{sub}}$.

Table 1 – Specifications of reference rods

Reference rod	f_0 GHz	$\varepsilon'_{\text{rod}}$	$\tan\delta_{\text{rod}}$	diameter d mm	height h mm
Sapphire single crystal	13	$9,4 \pm 0,1$	13×10^{-6}	$10,00 \pm 0,05$	$5,00 \pm 0,05$
$(\text{Zr},\text{Sn})\text{TiO}_4$ ceramics	5	39 ± 1	$< 10 \times 10^{-4}$	$14,00 \pm 0,05$	$6,46 \pm 0,05$

NOTE 1 The reference dielectric rod of $(\text{Zr},\text{Sn})\text{TiO}_4$ is provided by JFCC (Japan fine ceramics center¹) as ER-ZST.

¹ Japan fine ceramics center is an example of a suitable commercial supplier. This information is given for the convenience of users of this document and does not constitute an endorsement by IEC of this supplier.

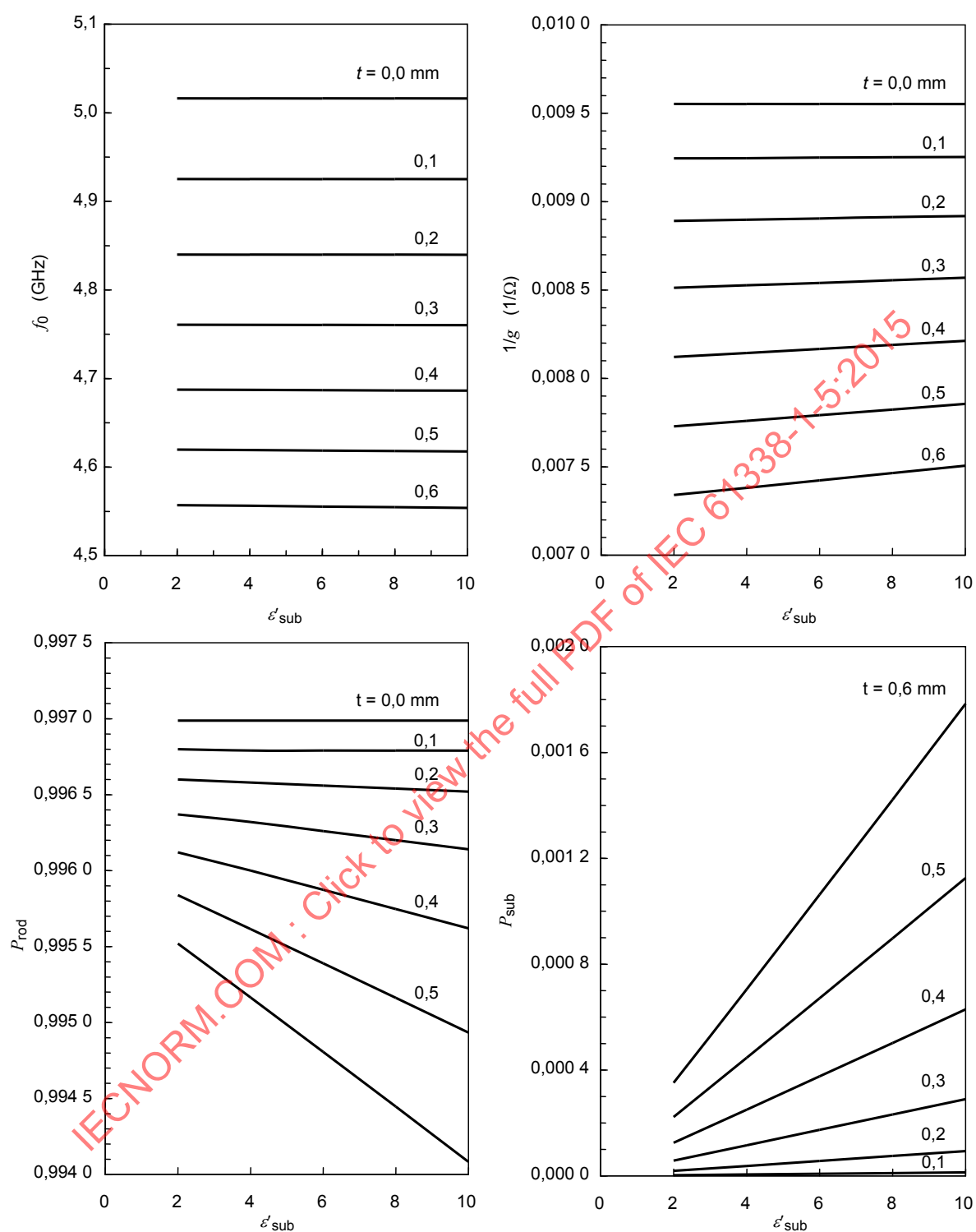


IEC

The calculation conditions are the following:

$\epsilon'_{\text{rod}} = 9,4$, $d = 10,00$ mm and $h = 5,00$ mm.

Figure 3 – Parameters chart of f_0 , g , P_{rod} and P_{sub} for reference sapphire rod



IEC

The calculation conditions are the following:

$\epsilon'_{\text{rod}} = 39$, $d = 14,00$ mm and $h = 6,46$ mm.

Figure 4 – Parameters chart of f_0 , g , P_{rod} and P_{sub} for reference (Zr,Sn)TiO₄ rod

5 Preparation of specimen

Two test specimens of dielectric substrates with a conductor at one side are prepared for the σ_i measurement. The thickness of the conductor t_c shall be three times greater than the skin depth δ . The values of δ is $0,9 \mu\text{m}$ for copper and $1,7 \mu\text{m}$ for tungsten at 5 GHz. The diameter d' of dielectric substrate shall be three times greater than the diameter d of the reference dielectric rod. Dielectric substrates with any shape larger than the diameter $3 \times d$ is used in practical measurement. Bending of specimen causes measurement error of σ_i . A substrate/conductor/substrate layer structure, where a conductor is formed between two dielectric substrates, is effective to avoid the bending of specimen.

6 Measurement equipment and apparatus

6.1 Measurement equipment

Figure 5 shows a schematic diagram of two measurement systems. For the measurement of Q_u of the resonator to evaluate σ_i , only the information on the amplitude of transmitted power is needed, that is, the information on the phase of the transmitted power is not required. Therefore, a scalar network analyzer can be used for the measurement shown in Figure 5(a). However, a vector network analyzer shown in Figure 5(b) has better measurement accuracy than a scalar network analyzer due to its wide dynamic range.

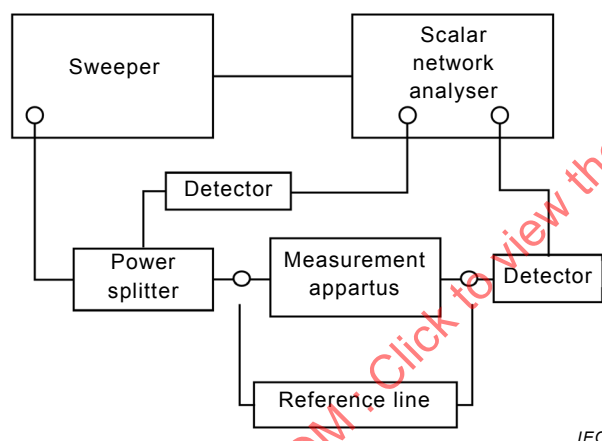


Figure 5a) Scalar network analyzer system

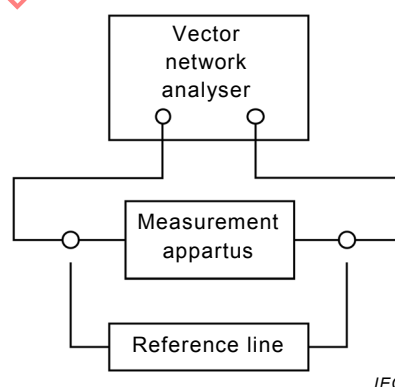


Figure 5b) Vector network analyzer system

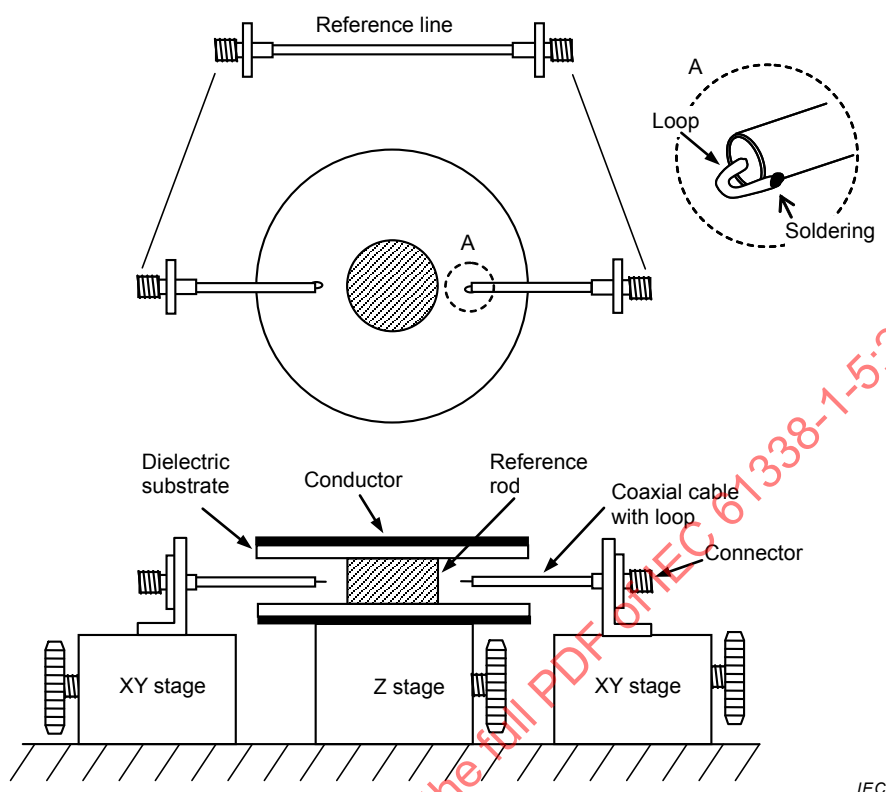
Figure 5 – Schematic diagram of measurement equipments

6.2 Measurement apparatus

Figure 6 shows a measurement apparatus for σ_i . The reference dielectric rod is placed between the dielectric sides of two substrates with a conductor at one side. Two substrates are set to be parallel to each other.

Each of the two semi-rigid coaxial cables have a small loop at the top. The semi-rigid cable with the outer diameter of 1,2 mm is recommended. The two loops have the same diameter and the length shall be less than the quarter wavelength of measurement frequency. In practice, the loop with a diameter from 1 mm to 2 mm is preferable for the measurement around 10 GHz. The plane of the loop is set parallel to the dielectric substrates to suppress the excitation of the unwanted TM mode. The cables can move right and left to adjust the insertion attenuation IA_0 at f_0 to be around 30 dB (as shown in Figure 8). The IA_0 value is recommended to be between 20 dB and 30 dB, in order to decrease the field disturbance due to the coupling loop and to decrease the noise influence on the resonance curve of the network analyzer.

A reference line made of a semi-rigid cable, shown in Figure 6, is used to measure the full transmission power level, i.e., the reference level as shown in Figure 8. This cable has a length equal to the sum of the two cables with a loop.



IEC

Figure 6 – Schematic diagram of measurement apparatus for σ_i .

7 Measurement procedure

7.1 Set-up of measurement equipment and apparatus

Set up the measurement equipment and apparatus as shown in Figures 5 and 6. Relative humidity shall be less than 60 %, because high humidity degrades Q_u .

7.2 Measurement of reference level

Measure the reference transmission level, shown in Figure 8, over the entire measurement frequency range.

7.3 Measurement procedure of Q_u

Place the reference dielectric rod between the dielectric sides of two substrates. Adjust the distance between the reference rod and each of the loops of the semi-rigid cables to be equal.

Find the $TE_{01\delta}$ mode resonance peak of the resonator on the display of the network analyzer, by reading the approximate f_0 value of the $TE_{01\delta}$ mode resonance from Figures 3 or 4 for each reference rod. This peak can be identified as the one which shifts downward in frequency when the upper substrate is slowly separated from the top of the reference dielectric rod. Figure 7 shows an example of frequency response for a resonator.

Narrow the frequency span, so that only the resonance peak of $TE_{01\delta}$ mode can be shown on the display as shown in Figure 8. By changing the distance between the reference dielectric rod and the loops of the semi-rigid cables, adjust IA_0 to be around 30 dB from the reference level.

Measure f_0 , the half-power band-width f_{BW} and IA_0 . The loaded quality factor Q_L and the unloaded quality factor Q_u of this resonance mode are given by

$$Q_L = \frac{f_0}{f_{BW}} \quad (6)$$

$$Q_u = \frac{Q_L}{1 - A_t}, \quad A_t = 10^{-|IA_0(\text{dB})|/20} \quad (7)$$

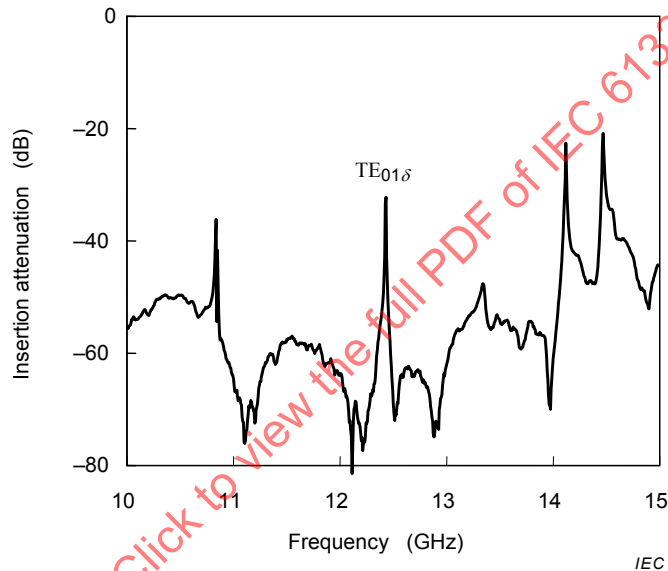


Figure 7 – Frequency response for reference sapphire rod with two dielectric substrates as shown in Figure 2.

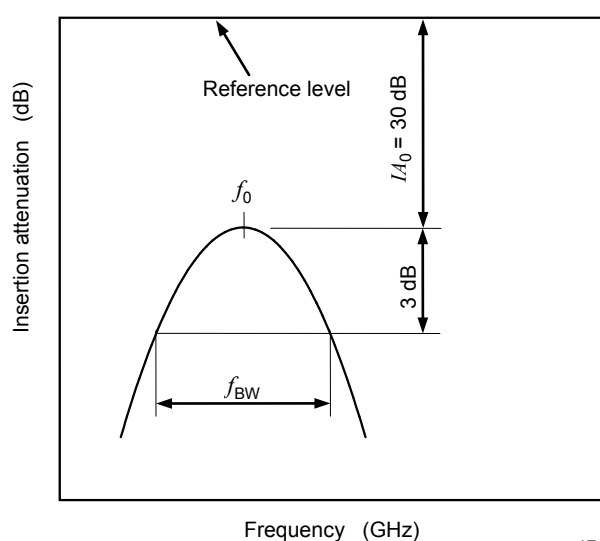


Figure 8 – Resonance frequency f_0 , insertion attenuation I_{A0} and half-power band width f_{BW}

7.4 Determination of σ_i and measurement uncertainty

Repeat the measurement of Q_u several times. Then, calculate R_i from the mean value of Q_u using Equation (5). The values g , P_{rod} and P_{sub} are given from Figures 3 and 4 using the ε'_{sub} and thickness t of the test substrate. The values σ_i and σ_{ri} are given from R_i using Equation (2).

Measurement uncertainty of σ_i , $\Delta\sigma_i$, estimated as the mean square errors is given by

$$(\Delta\sigma_i)^2 = (\Delta\sigma_{i,Q_u})^2 + (\Delta\sigma_{i,\tan\delta_{rod}})^2 + (\Delta\sigma_{i,\tan\delta_{sub}})^2 \quad (8)$$

where

- $\Delta\sigma_{i,Q_u}$ is the uncertainty of σ_i due to standard deviations of Q_u ;
- $\Delta\sigma_{i,\tan\delta_{rod}}$ is the uncertainty of σ_i due to standard deviations of $\tan\delta_{rod}$;
- $\Delta\sigma_{i,\tan\delta_{sub}}$ is the uncertainty of σ_i due to standard deviations of $\tan\delta_{sub}$.

8 Example of measurement result

Table 2 shows the values of ε'_{rod} and $\tan\delta_{rod}$ for the reference rods measured by the dielectric rod resonator method (IEC 61338-1-3). Table 3 shows the values of ε'_{sub} and $\tan\delta_{sub}$ of a LTCC test substrate measured by the cavity resonator method (IEC 62562). A copper layer was co-fired in this substrate and the σ_i and σ_{ri} were measured. The results are shown in Table 4.

Table 2 – ε'_{rod} and $\tan\delta_{rod}$ of reference rods measured by the method of IEC 61338-1-3

Reference Rod	D mm	h mm	f_0 GHz	Q_u	ε'_{rod}	$\tan\delta_{rod}$ (10^{-4})
Sapphire	10,000 $\pm 0,001$	5,004 $\pm 0,001$	13,524 $\pm 0,002$	6 413 ± 52	9,435 $\pm 0,004$	0,13 $\pm 0,01$
(Zr,Sn)TiO ₄	14,000 $\pm 0,001$	6,465 $\pm 0,001$	4,9966 $\pm 0,0004$	3 612 ± 21	39,27 $\pm 0,01$	0,90 $\pm 0,02$

Table 3 – $\varepsilon'_{\text{sub}}$ and $\tan\delta_{\text{sub}}$ of an LTCC test substrate measured by the method of IEC 62562

d' mm	t mm	f_0 GHz	Q_u	$\varepsilon'_{\text{sub}}$	$\tan\delta_{\text{sub}}$ (10^{-4})
50	0,965 $\pm 0,08$	10,287 $\pm 0,003$	3 313 ± 22	4,76 $\pm 0,04$	7,18 $\pm 0,05$

Table 4 – Measurement results of σ_i and σ_{ri} of a copper layer in LTCC substrate

Reference rod	f_0 GHz	Q_u	σ_i 10^7 S/m	σ_{ri} %
Sapphire	12,426 $\pm 0,002$	6 725 ± 5	3,68 $\pm 0,05$	63,5 $\pm 0,9$
(Zr,Sn)TiO ₄	4,6626 $\pm 0,0003$	3 738 ± 20	3,83 $\pm 0,10$	66,0 $\pm 1,8$

NOTE The calculation conditions are $\varepsilon'_{\text{sub}} = 4,76$, $d' = 45$ mm and $t = 0,415$ mm.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61338-1-5:2015

Annex A (informative)

Derivation of Equation (4) for R_i

The unloaded quality factor Q_u is defined by

$$\frac{1}{Q_u} = \frac{P_d}{\omega_0 W} \quad (\text{A.1})$$

where

- P_d is the power dissipated in the resonator per second;
- ω_0 is $2\pi \times f_0$;
- W is the energy stored in the resonator.

In the $TE_{01\delta}$ dielectric rod resonator (Figure 2), P_d and W are given by

$$P_d = P_{ci} + \omega_0 W_{rod} \tan \delta_{rod} + \omega_0 W_{sub} \tan \delta_{sub} \quad (\text{A.2})$$

$$W = W_{rod} + W_{sub} + W_{air} \quad (\text{A.3})$$

where

- P_{ci} is the conductive energy loss at the interface between the conductor and the dielectric substrate;
- W_{rod} is the electric energy stored in the dielectric rod;
- W_{sub} is the electric energy stored in the dielectric substrate;
- W_{air} is the electric energy stored in the air region;
- $\omega_0 W_{rod} \tan \delta_{rod}$ is the dielectric energy loss in the dielectric rod;
- $\omega_0 W_{sub} \tan \delta_{sub}$ is the dielectric energy loss in the dielectric substrate.

Equation (3) is obtained from Equation (A.1), (A.2) and (A.3), using the parameters, g , P_{rod} and P_{sub} defined as follows:

$$\frac{1}{g} = \frac{P_{ci}}{\omega W R_{si}} = \frac{\frac{1}{2} \iint |H_t|^2 ds}{\omega W} \quad (\text{A.4})$$

$$P_{rod} = \frac{W_{rod}}{W} = \frac{\frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon'_{rod} \iiint_{V_{rod}} |E|^2 dv}{W} \quad (\text{A.5})$$

$$P_{sub} = \frac{W_{sub}}{W} = \frac{\frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon'_{sub} \iiint_{V_{sub}} |E|^2 dv}{W} \quad (\text{A.6})$$

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \left(\varepsilon'_{\text{rod}} \iiint_{V_{\text{rod}}} |E|^2 dv + \varepsilon'_{\text{sub}} \iiint_{V_{\text{sub}}} |E|^2 dv + \iiint_{V_{\text{air}}} |E|^2 dv \right) \quad (\text{A.7})$$

where

$\iint |H_t|^2 ds$ is the surface integration of the tangential magnetic field at the interface between the conductor and the dielectric substrate.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61338-1-5:2015

Annex B (informative)

Calculation uncertainty of parameters in Figure 3

The parameters f_0 , g , P_{rod} and P_{sub} in Figures 3 and 4 were calculated by using a FEM analyzed in cylindrical coordinate. The resonator structure for $t = 0,0$ mm in Figure 2 corresponds to the TE_{011} mode dielectric resonator short-circuited at the both ends, described in IEC 61338-1-3. So, the comparison of the calculated parameters for $t = 0,0$ mm by the FEM and by the rigorous analysis in IEC 61338-1-3 gives the calculation uncertainty of the FEM. Table B.1 shows calculated results for the TE_{011} mode sapphire resonator with the values of $\varepsilon'_{\text{rod}} = 9,4$, $d = 10,0$ mm and $h = 5,0$ mm. The difference between the two methods is negligibly small for the calculation of R_i and σ_i .

The parameters in Figure 3 were calculated for the reference sapphire rod with $\varepsilon'_{\text{rod}} = 9,4$. The actual sapphire rod usually has the $\varepsilon'_{\text{rod}}$ in the range from 9,35 to 9,45. Table B.2 shows the calculated parameters for the sapphire rods with $\varepsilon'_{\text{rod}} = 9,4$ and 9,3. It shows that this difference of 0,1 on $\varepsilon'_{\text{rod}}$ results in the calculation difference of 0,06 % on σ_{ri} . This value is negligibly small, compared with the measurement uncertainties of σ_{ri} given in Table 4.

**Table B 1 – Parameters obtained by FEM and rigorous analysis
of IEC 61338-1-3 for the TE_{011} mode resonator**

Parameter	FEM	IEC 61338-1-3	Difference
f_0 (GHz)	13,5566	13,5545	0,0021
$1/g$ (1/Ω)	0,004432	0,004436	-0,000004
P_{rod}	0,98319	0,98321	-0,00002

NOTE The calculation conditions are $\varepsilon'_{\text{rod}} = 9,4$, $d = 10,0$ mm, and $h = 5,0$ mm.

**Table B.2 – Calculated parameters f_0 , g , P_{rod} , P_{sub} , R_i , σ_i and σ_{ri} for
the TE_{015} mode resonator**

Parameter	$\varepsilon'_{\text{rod}} = 9,4$	$\varepsilon'_{\text{rod}} = 9,3$	Difference
f_0 (GHz)	12,2452	12,3089	-0,0637
$1/g$ (1/Ω)	0,003584	0,003570	0,000014
P_{rod}	0,9707	0,9703	0,0004
P_{sub}	0,00569	0,00575	-0,00006
R_i (mΩ)	41,60	41,73	-0,13
σ_i (10^7 S/m)	2,794	2,790	0,004
σ_{ri} (%)	48,17	48,11	0,06

NOTE The calculation conditions are $\varepsilon'_{\text{sub}} = 6,0$, $\tan\delta_{\text{sub}} = 0,001$, $t = 0,5$ mm, and $Q_u = 6\,000$.

Bibliography

- [1] A. Nakayama, Y. Terashi, H. Uchimura, and A. Fukuura, "*Conductivity measurements at the interface between the sintered conductor and dielectric substrate at microwave frequencies,*" *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, Vol. 50, No. 7, pp. 1665-1674, July, 2002.
- [2] Y. Kobayashi, "*Microwave characterization of copper-clad dielectric laminate substrates,*" *IEICE Trans. Electronics*, Vol.E90-C, No.12, pp. 2178-2184, Dec, 2007.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61338-1-5:2015

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61338-1-5:2015

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	23
INTRODUCTION.....	25
1 Domaine d'application.....	26
2 Références normatives.....	26
3 Mesure et paramètres associés.....	26
4 Equations de calcul pour R_i et σ_i	28
5 Préparation des spécimens.....	32
6 Equipements et appareillage de mesure.....	32
6.1 Equipements de mesure.....	32
6.2 Appareillage de mesure.....	32
7 Procédure de mesure.....	33
7.1 Montage de l'équipement et de l'appareillage de mesure.....	33
7.2 Mesure du niveau de référence.....	33
7.3 Procédure de mesure de Q_U	33
7.4 Détermination de σ_i et incertitude de mesure.....	35
8 Exemple de résultat de mesure.....	35
Annexe A (informative) Dérivation de l'Equation (4) pour R_i	37
Annexe B (informative) Incertitude de calcul des paramètres de la Figure 3.....	39
Bibliographie.....	40
Figure 1 – Résistance de surface R_S , conductivité de surface σ_S , résistance d'interface R_i et conductivité d'interface σ_i	27
Figure 2 – Résonateur en barreau diélectrique en mode $TE_{01\delta}$ pour la mesure de σ_i	28
Figure 3 – Représentation des paramètres f_0 , g , P_{rod} et P_{sub} pour un barreau de saphir de référence.....	30
Figure 4 – Représentation des paramètres f_0 , g , P_{rod} et P_{sub} pour un barreau (Zr,Sn)TiO ₄ de référence.....	31
Figure 5 – Représentation schématique d'équipements de mesure.....	32
Figure 6 – Représentation schématique d'un appareillage de mesure pour σ_i	33
Figure 7 – Réponse en fréquence pour un barreau de saphir de référence avec deux substrats diélectriques comme représenté sur la Figure 2.....	34
Figure 8 – Fréquence de résonance f_0 , affaiblissement d'insertion et bande passante à mi-puissance f_{BW}	35
Tableau 1 – Spécifications de barreaux de référence.....	29
Tableau 2 – Valeurs ε'_{rod} et $\tan\delta_{rod}$ des barreaux de référence mesurées par la méthode de l'IEC 61338-1-3.....	36
Tableau 3 – Valeurs ε'_{sub} et $\tan\delta_{sub}$ d'un substrat d'essai LTCC mesurées par la méthode de l'IEC 62562.....	36
Tableau 4 – Résultats de mesure de σ_i et σ_{ri} d'une couche de cuivre dans un substrat LTCC.....	36
Tableau B.1 – Paramètres obtenus par la méthode des éléments finis (MEF) et par l'analyse rigoureuse de l'IEC 61338-1-3 pour le résonateur en mode TE_{011}	39
Tableau B.2 – Paramètres calculés f_0 , g , P_{rod} , P_{sub} , R_i , σ_i et σ_{ri} pour le résonateur en mode $TE_{01\delta}$	39

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

RÉSONATEURS DIÉLECTRIQUES À MODES GUIDÉS –

**Partie 1-5: Informations générales et conditions d'essais –
Méthode de mesure de la conductivité au niveau de l'interface
entre une couche conductrice et un substrat diélectrique
fonctionnant aux hyperfréquences**

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.

La Norme internationale IEC 61338-1-5 a été établie par le comité d'études 49 de l'IEC: Dispositifs piézoélectriques, diélectriques et électrostatiques et matériaux associés pour la détection, le choix et la commande de la fréquence.

Cette première édition annule et remplace l'IEC PAS 61338-1-5 parue en 2010.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- a) description de contenu technique lié à des brevets (brevets japonais numéro JP3634966 et JP3735501) dans l'Introduction ;
- b) modifications de références normatives ;
- c) ajout bibliographique.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

CDV	Rapport de vote
49/1089/CDV	49/1103/RVC

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/IEC, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 61338, publiées sous le titre général *Résonateurs diélectriques à modes guidés*, peut être consultée sur le site web de l'IEC

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61338-1-5:2015

INTRODUCTION

L'IEC 61338 comprend les parties suivantes, publiées sous le titre général *Résonateurs diélectriques à modes guidés*:

- Partie 1: Spécification générique
- Partie 1-3: Informations générales et conditions d'essais – Méthode de mesure de la permittivité relative complexe des matériaux diélectriques pour résonateurs diélectriques fonctionnant aux hyperfréquences
- Partie 1-4: Informations générales et conditions d'essais – Méthode de mesure de la permittivité relative complexe des matériaux des résonateurs diélectriques fonctionnant à des fréquences millimétriques
- Partie 2: Lignes directrices pour l'application aux filtres et aux oscillateurs
- Partie 4: Spécification intermédiaire
- Partie 4-1: Spécification particulière-cadre

La Commission électrotechnique internationale (IEC) attire l'attention sur le fait qu'il est déclaré que la conformité avec les dispositions du présent document peut impliquer l'utilisation d'un brevet concernant:

- L'utilisation d'un résonateur en barreau diélectrique en mode $TE_{01\delta}$ pour la mesure de la résistance d'interface et de la conductivité d'interface, résonateur présenté à l'Article 4;
- L'utilisation d'une structure en couches substrat/conducteur/substrat, dans laquelle un conducteur est formé entre deux substrats diélectriques, pour la mesure de la résistance d'interface et de la conductivité d'interface, structure présentée à l'Article 5.

L'IEC ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à la portée de ces droits de propriété.

Le détenteur de ces droits de propriété a donné l'assurance à l'IEC qu'il consent à négocier des licences avec des demandeurs du monde entier, soit sans frais, soit à des termes et conditions raisonnables et non discriminatoires. A ce propos, la déclaration du détenteur des droits de propriété est enregistrée à l'IEC. Des informations peuvent être demandées à:

KYOCERA Corporation

6 Takeda Tobadono-cho, Fushimiku, Kyoto 612-8501, Japon

L'attention est d'autre part attirée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété autres que ceux qui ont été mentionnés ci-dessus. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de l'identification de ces droits de propriété en tout ou partie.

L'ISO (www.iso.org/patents) et l'IEC (<http://patents.iec.ch>) maintiennent des bases de données, consultables en ligne, des droits de propriété pertinents à leurs normes. Les utilisateurs sont encouragés à consulter ces bases de données pour obtenir l'information la plus récente concernant les droits de propriété.

RÉSONATEURS DIÉLECTRIQUES À MODES GUIDÉS –

Partie 1-5: Informations générales et conditions d'essais – Méthode de mesure de la conductivité au niveau de l'interface entre une couche conductrice et un substrat diélectrique fonctionnant aux hyperfréquences

1 Domaine d'application

Les circuits hyperfréquences sont souvent formés sur des substrats organiques ou non organiques multicouches. Dans les circuits hyperfréquences, l'affaiblissement des lignes de transmission planaires telles que les lignes à ruban, les lignes à microruban et les lignes coplanaires, est déterminé par les pertes dans les conducteurs, les pertes diélectriques et les pertes par rayonnement. Parmi ces pertes, les pertes dans les conducteurs contribuent fortement à l'affaiblissement des lignes de transmission planaires. Une nouvelle méthode de mesure est normalisée dans le présent document pour évaluer la conductivité d'une ligne de transmission sur ou dans les substrats, par exemple les substrats organiques, les substrats en céramique et les substrats en céramique cofrittée à basse température. La présente norme décrit une méthode de mesure de la résistance et de la conductivité efficace au niveau de l'interface entre la couche conductrice et le substrat diélectrique, appelées résistance d'interface et conductivité d'interface.

Les caractéristiques de cette méthode de mesure sont les suivantes:

- la résistance d'interface R_i est obtenue en mesurant la fréquence de résonance f_0 et le facteur de qualité à vide Q_u d'un résonateur en barreau diélectrique en mode $TE_{01\delta}$ représenté à la Figure 2;
- la conductivité d'interface σ_i et la conductivité d'interface relative $\sigma_{ri} = \sigma_i / \sigma_0$ sont calculées à partir de la valeur R_i mesurée, où $\sigma_0 = 5,8 \times 10^7$ S/m est la conductivité de référence du cuivre;
- l'incertitude de mesure de σ_{ri} ($\Delta\sigma_{ri}$) est inférieure à 5 %.

2 Références normatives

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

IEC 61338-1-3, *Résonateurs diélectriques à modes guidés – Partie 1-3: Informations générales et conditions d'essais – Méthode de mesure de la permittivité relative complexe des matériaux diélectriques pour résonateurs diélectriques fonctionnant aux hyperfréquences*

IEC 62562, *Méthode de la cavité résonante pour mesurer la permittivité complexe des plaques diélectriques à faibles pertes*

3 Mesure et paramètres associés

L'IEC 61338-1-3 décrit la méthode de mesure de la résistance de surface R_s et de la conductivité efficace σ sur la surface du conducteur. Dans la présente norme, le terme σ est désigné par σ_s et appelé conductivité de surface (Figure 1). La présente norme décrit une méthode de mesure de la résistance R_i et de la conductivité efficace au niveau de l'interface entre la couche conductrice et le substrat diélectrique, appelées respectivement résistance d'interface et conductivité d'interface.

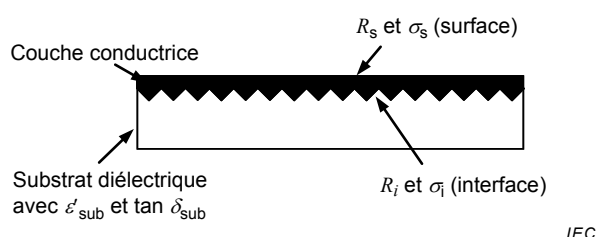


Figure 1 – Résistance de surface R_s , conductivité de surface σ_s , résistance d'interface R_i et conductivité d'interface σ_i .

Pour la ligne de transmission dans les substrats, le courant électrique est concentré au niveau de l'interface entre la couche conductrice et le substrat diélectrique, parce que l'épaisseur de peau δ dans le conducteur est de l'ordre du μm dans le domaine des hyperfréquences. Dans les lignes à microruban, le courant est concentré au niveau de l'interface plutôt qu'au niveau de la face ouverte du conducteur. En outre, dans des substrats organiques plaqués de cuivre, le côté interface de la feuille de cuivre a une structure en dents de scie pour assurer une forte adhérence. Dans les substrats LTCC, l'interface entre le conducteur et la céramique est de structure rugueuse, en fonction du processus de cofrittage et de la composition des matériaux. Les pertes dans les conducteurs dépendent des conditions d'interface. Par conséquent, l'évaluation de R_i et de σ_i est importante pour concevoir un circuit hyperfréquences et améliorer le processus de fabrication des conducteurs.

La relation entre R_s et σ_s est donnée par

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu}{\sigma_s}}, \quad \sigma_s = \sigma_{rs} \sigma_0 \quad (1)$$

où

- R_s est la résistance de surface;
- f_0 est la fréquence de résonance;
- μ est la perméabilité du conducteur;
- σ_s est la conductivité de surface;
- σ_{rs} est la conductivité de surface relative.

En particulier, $\mu = \mu_0$ ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$) pour les conducteurs non magnétiques tels que le cuivre et l'argent.

La relation entre R_i et σ_i est donnée par

$$R_i = \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu}{\sigma_i}}, \quad \sigma_i = \sigma_{ri} \sigma_0 \quad (2)$$

où

- R_i est la résistance d'interface;
- σ_i est la conductivité d'interface;
- σ_{ri} est la conductivité d'interface relative.

L'épaisseur de peau δ est définie comme suit

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad (3)$$

où

f est la fréquence;
 σ est la conductivité du conducteur.

Pour obtenir une haute précision avec cette méthode de mesure, il est préférable que la conductivité d'interface relative σ_i du conducteur soit supérieure à 5 % et que l'épaisseur du conducteur soit trois fois supérieure à l'épaisseur de peau δ . Les fréquences de mesure sont limitées à 5 GHz et 13 GHz en raison des barreaux diélectriques de référence utilisés dans la présente norme.

4 Equations de calcul pour R_i et σ_i

La Figure 2 représente la structure d'un résonateur en barreau diélectrique en mode $TE_{01\delta}$ pour la mesure de R_i . Le résonateur est constitué d'un barreau diélectrique et d'une paire de substrats diélectriques avec une couche conductrice située à une extrémité. Le barreau diélectrique a un diamètre d , une hauteur h , une permittivité relative ϵ'_{rod} et une tangente de perte $\tan \delta_{rod}$. Les deux substrats diélectriques ont le même diamètre d' , la même épaisseur t , la même permittivité relative ϵ'_{sub} et la même tangente de perte $\tan \delta_{sub}$. Pour supprimer les pertes par rayonnement, le diamètre d' doit être trois fois plus grand que d . Les couches conductrices sur chaque substrat diélectrique sont supposées avoir la même valeur R_i .

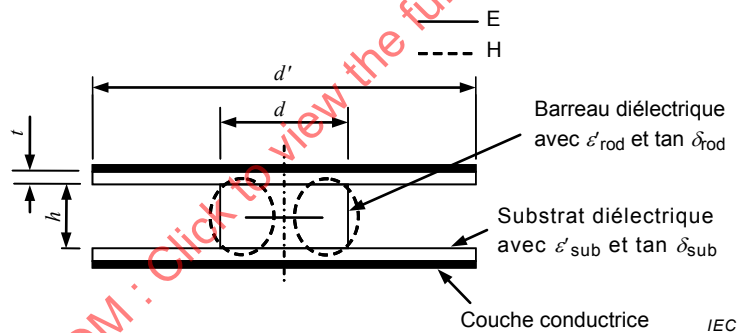


Figure 2 – Résonateur en barreau diélectrique en mode $TE_{01\delta}$ pour la mesure de σ_i

Dans cette structure, les pertes par conduction du résonateur en mode $TE_{01\delta}$ sont causées par la résistance d'interface R_i . La valeur $1/Q_u$ est donnée par une somme de pertes de puissance dues R_i , $\tan \delta_{rod}$ et $\tan \delta_{sub}$:

$$\frac{1}{Q_u} = \frac{R_i}{g} + P_{rod} \tan \delta_{rod} + P_{sub} \tan \delta_{sub} , \quad (4)$$

où

g est le facteur géométrique du résonateur (Ω);
 P_{rod} est le facteur de remplissage d'énergie électrique partielle du barreau diélectrique;
 P_{sub} est le facteur de remplissage d'énergie électrique partielle du substrat diélectrique.

L'équation pour R_i est dérivée de l'Equation (4):

$$R_i = g \left(\frac{1}{Q_u} - P_{\text{rod}} \tan \delta_{\text{rod}} - P_{\text{sub}} \tan \delta_{\text{sub}} \right) \quad (5)$$

La valeur σ_i est calculée à partir de cette valeur R_i par l'Equation (2).

La dérivation de l'Equation (4) est donnée à l'Annexe A, ainsi que les définitions des paramètres g , P_{rod} et P_{sub} . Ces paramètres pour le résonateur en mode $\text{TE}_{01\delta}$ peuvent être calculés en utilisant la méthode des éléments finis (MEF) ou la méthode de correspondance des modes. Toutefois, les calculs sont fastidieux et compliqués. Pour simplifier le traitement, la présente norme recommande l'utilisation de représentations graphiques préparées pour les paramètres des résonateurs en barreau diélectrique de référence; du saphir monocristallin et de la céramique $(\text{Zr},\text{Sn})\text{TiO}_4$ (voir Tableau 1). Il convient que l'axe du barreau de saphir soit parallèle à l'axe c avec une tolérance de 0,3 degré. Le barreau en céramique $(\text{Zr},\text{Sn})\text{TiO}_4$ est fourni par le "Japan fine ceramics center". Les paramètres f_0 , g , P_{rod} et P_{sub} pour les barreaux de référence ont été calculés par la méthode des éléments finis analysée en coordonnées cylindriques et sont présentés sous forme graphique dans les Figures 3 et 4. L'incertitude de calcul sur les paramètres est présentée à l'Annexe B.

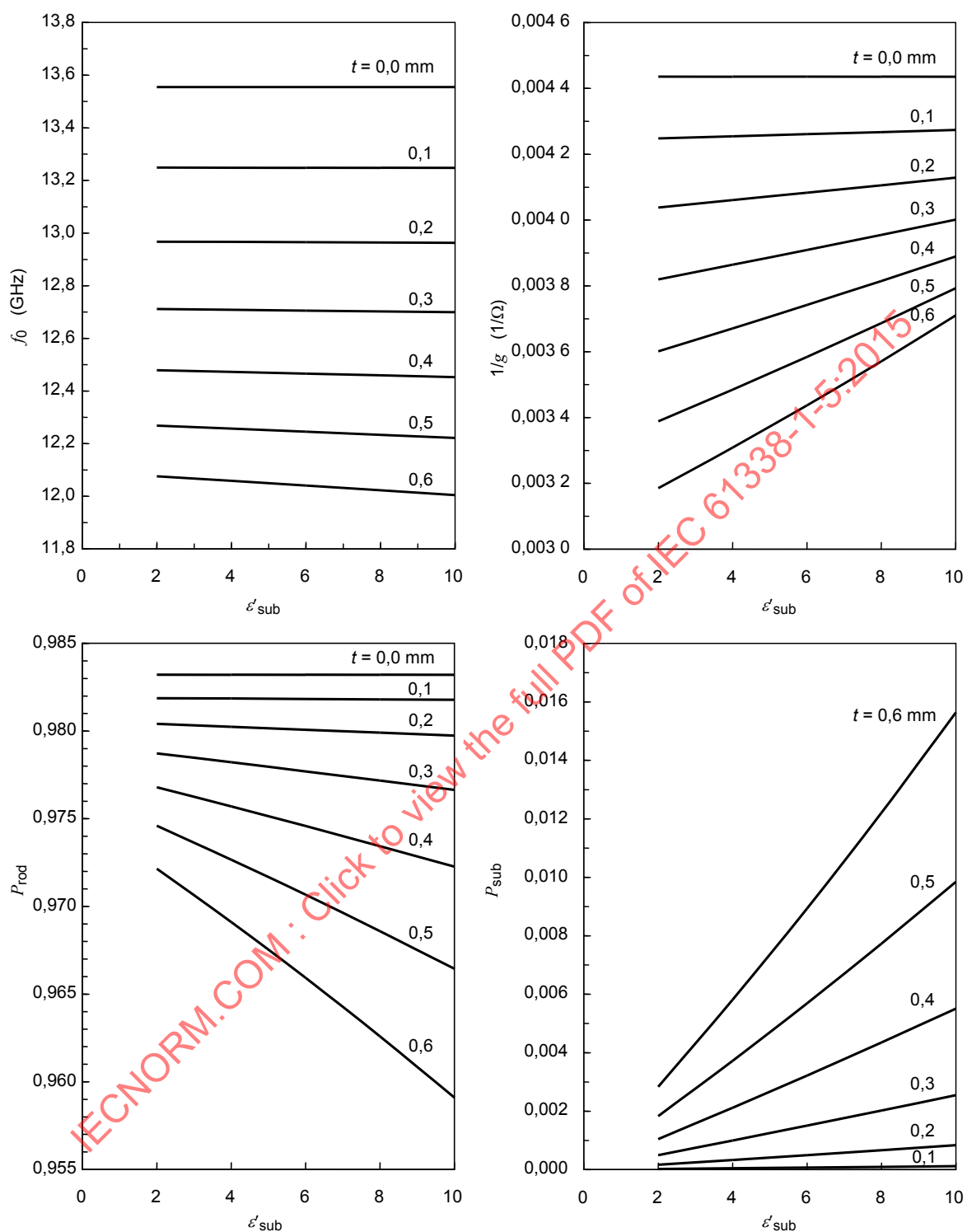
Pour calculer R_i dans l'Equation (5), les valeurs de la permittivité complexe du barreau diélectrique et du substrat doivent être données à l'avance. L'IEC 61338-1-3 doit être utilisée pour mesurer les valeurs $\varepsilon'_{\text{rod}}$ et $\tan \delta_{\text{rod}}$. L'IEC 62562 doit être utilisée pour mesurer les valeurs $\varepsilon'_{\text{sub}}$ et $\tan \delta_{\text{sub}}$.

Tableau 1 – Spécifications de barreaux de référence

Barreau de référence	f_0 GHz	$\varepsilon'_{\text{rod}}$	$\tan \delta_{\text{rod}}$	diamètre d mm	hauteur h mm
Saphir monocristallin	13	$9,4 \pm 0,1$	13×10^{-6}	$10,00 \pm 0,05$	$5,00 \pm 0,05$
Céramique $(\text{Zr},\text{Sn})\text{TiO}_4$	5	39 ± 1	$< 10 \times 10^{-4}$	$14,00 \pm 0,05$	$6,46 \pm 0,05$

NOTE 1 Le barreau diélectrique de référence $(\text{Zr},\text{Sn})\text{TiO}_4$ est fourni par le "Japan fine ceramics center"¹ sous la dénomination ER-ZST.

¹ Le "Japan fine ceramics center" est un exemple de fournisseur approprié. Cette information est donnée à l'intention des utilisateurs du présent document et ne signifie nullement que l'IEC approuve ou recommande ce fournisseur.

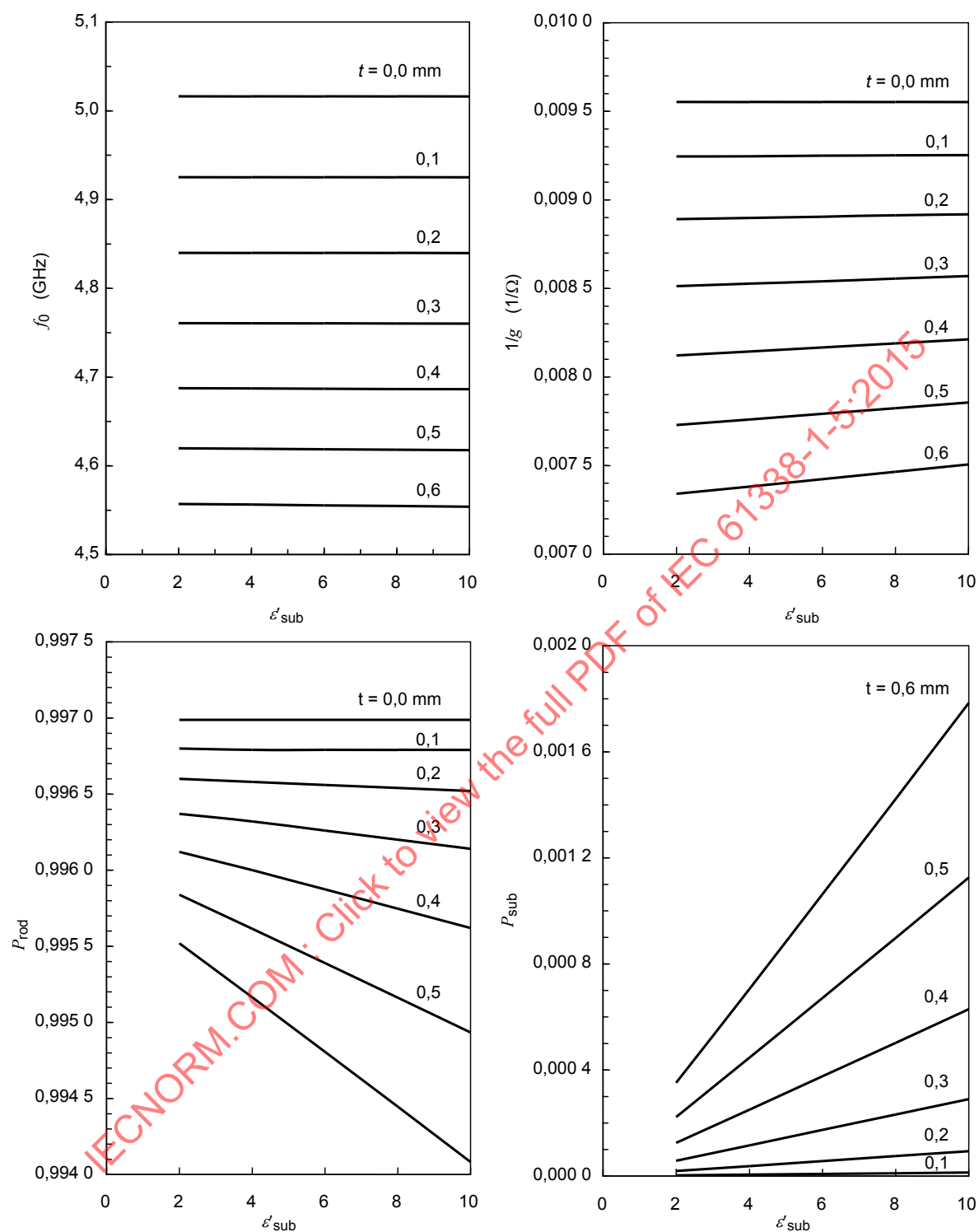


IEC

Les conditions de calcul sont les suivantes:

$\epsilon'_{\text{rod}} = 9,4$, $d = 10,00$ mm et $h = 5,00$ mm.

Figure 3 – Représentation des paramètres f_0 , g , P_{rod} et P_{sub} pour un barreau de saphir de référence



IEC

Les conditions de calcul sont les suivantes:

$\epsilon'_{\text{rod}} = 39$, $d = 14,00$ mm et $h = 6,46$ mm.

Figure 4 – Représentation des paramètres f_0 , g , P_{rod} et P_{sub} pour un barreau $(\text{Zr,Sn})\text{TiO}_4$ de référence

5 Préparation des spécimens

Deux spécimens d'essai de substrats diélectriques avec un conducteur sur un côté sont préparés pour la mesure de σ_i . L'épaisseur du conducteur t_c doit être trois fois supérieure à l'épaisseur de peau δ . La valeur δ est $0,9 \mu\text{m}$ pour le cuivre et $1,7 \mu\text{m}$ pour le tungstène à 5 GHz. Le diamètre d' du substrat diélectrique doit être trois fois plus grand que le diamètre d du barreau diélectrique de référence. Des substrats diélectriques de n'importe quelle forme plus grande que le diamètre $3 \times d$ sont utilisés pour les mesures pratiques. Une courbure du spécimen provoque une erreur de mesure de σ_i . Une structure en couches substrat/conducteur/substrat, dans laquelle un conducteur est formé entre deux substrats diélectriques, permet d'éviter une courbure du spécimen.

6 Equipements et appareillage de mesure

6.1 Equipements de mesure

La Figure 5 est une représentation schématique de deux systèmes de mesure. Pour la mesure de Q_u du résonateur pour évaluer σ_i , seules les informations sur l'amplitude de la puissance transmise sont nécessaires. Les informations sur la phase de la puissance transmise ne sont pas exigées. Ainsi, un analyseur de réseau scalaire peut être utilisé pour la mesure représentée à la Figure 5(a). Toutefois, un analyseur de réseau vectoriel représenté à la Figure 5(b) a une meilleure précision de mesure qu'un analyseur de réseau scalaire en raison de sa grande plage dynamique.

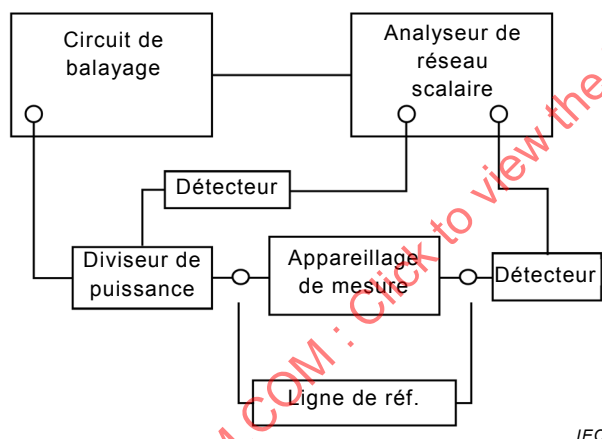


Figure 5a) Système à analyseur de réseau scalaire

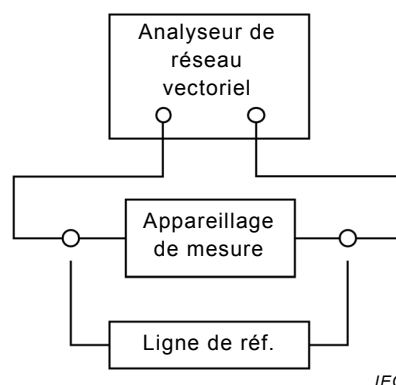


Figure 5b) Système à analyseur de réseau vectoriel

Figure 5 – Représentation schématique d'équipements de mesure

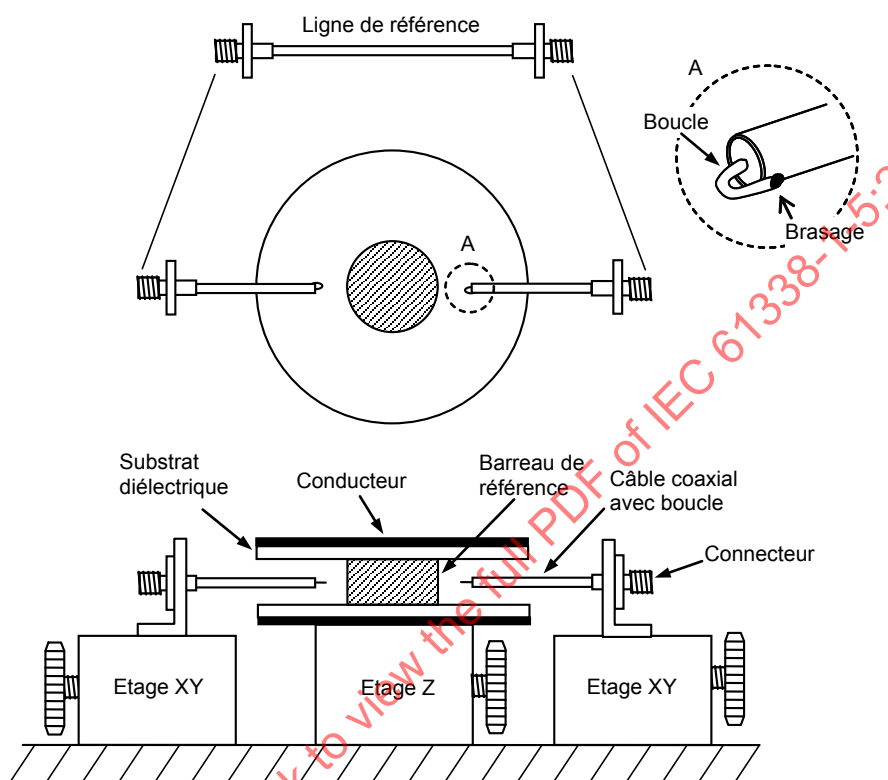
6.2 Appareillage de mesure

La Figure 6 représente un appareillage de mesure pour σ_i . Le barreau diélectrique de référence est placé entre les côtés diélectriques de deux substrats avec un conducteur d'un côté. Les deux substrats sont parallèles.

Chaque câble coaxial semi-rigide a une petite boucle à son extrémité. Il est recommandé d'utiliser des câbles semi-rigides dont le diamètre extérieur vaut $1,2 \text{ mm}$. Les deux boucles ont le même diamètre et leur longueur doit être inférieure au quart de la longueur d'onde de la fréquence de mesure. En pratique, une boucle de diamètre compris entre 1 mm et 2 mm est préférable pour des mesures autour de 10 GHz . Le plan de la boucle est parallèle aux substrats diélectriques pour supprimer l'excitation du mode TM indésirable. Les câbles peuvent bouger vers la droite et vers la gauche pour ajuster l'affaiblissement d'insertion IA_0 à f_0 pour qu'il se trouve autour de 30 dB (comme représenté sur la Figure 8). Il est recommandé

que la valeur IA_0 soit comprise entre 20 dB et 30 dB, pour diminuer la perturbation de champ due à la boucle de couplage et pour diminuer l'influence du bruit sur la courbe de résonance de l'analyseur de réseau.

Une ligne de référence constituée d'un câble semi-rigide représentée à la Figure 6, est utilisée pour mesurer le niveau total de puissance de transmission, c'est-à-dire le niveau de référence (représenté à la Figure 8). Ce câble a une longueur égale à la somme des deux câbles avec une boucle.



IEC

Figure 6 – Représentation schématique d'un appareillage de mesure pour σ_i

7 Procédure de mesure

7.1 Montage de l'équipement et de l'appareillage de mesure

Monter l'équipement et de l'appareillage de mesure comme représenté aux Figures 5 et 6. L'humidité relative doit être inférieure à 60 %, parce qu'une forte humidité dégrade Q_u .

7.2 Mesure du niveau de référence

Mesurer le niveau de transmission de référence, représenté à la Figure 8, sur toute la plage de fréquences de mesure.

7.3 Procédure de mesure de Q_u

Placer le barreau diélectrique de référence entre les côtés diélectriques de deux substrats. Régler la distance pour qu'elle soit la même entre le barreau diélectrique et chacune des boucles des câbles semi-rigides.