

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Waveguide type dielectric resonators –

Part 1-4: General information and test conditions – Measurement method of complex relative permittivity for dielectric resonator materials at millimetre-wave frequency

Résonateurs diélectriques à modes guidés –

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



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2005 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 14 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

More than 55 000 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 14 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

Plus de 55 000 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 1-4: General information and test conditions – Measurement method of
complex relative permittivity for dielectric resonator materials at millimetre-
wave frequency**

**Résonateurs diélectriques à modes guidés –
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**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX



ICS 31.140

ISBN 978-2-8322-1000-0

**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 and object.....	6
2 Normative references	6
3 Measurement parameter.....	7
4 Dielectric rod resonator method excited by NRD-guide	8
4.1 Measurement equipment and apparatus	8
4.2 Theory and calculation equations	11
4.3 Measurement procedure.....	16
4.4 Example of measurement result	19
5 Cut-off waveguide method excited by coaxial cables with small loops.....	21
5.1 Measurement equipment and apparatus	21
5.2 Theory and calculation equations	23
5.3 Measurement procedure.....	28
Annex A (informative) Errors on ε_r caused by air gap between dielectric specimen and upper conducting plate.....	30
Annex B (informative) Derivation of equation (15) for σ_r	31
Bibliography.....	33
Figure 1 – Schematic diagram of measurement equipment	8
Figure 2 – Measurement apparatus of dielectric rod resonator method excited by NRD-guide.....	9
Figure 3 – Waveguide transducer from NRD-guide to waveguide	11
Figure 4 – Configuration of a cylindrical dielectric rod resonator short-circuited at both ends by two parallel conducting plates	12
Figure 5 – Calculations of u^2 and W as a function of ν^2 for TE_{011} , TE_{021} and TE_{031} resonance modes	13
Figure 6 – Configuration of reference dielectric resonator for measurement of σ_r of conducting plates.....	15
Figure 7 – Diameter d of TE_{011} , TE_{021} and TE_{031} mode resonators with resonance frequency of 60 GHz	18
Figure 8 – Diameter d of TE_{011} , TE_{021} and TE_{031} mode resonators with resonance frequency of 77 GHz	19
Figure 9 – Example of TE_{021} mode resonant peak	20
Figure 10 – Measurement result of temperature dependence of f_0 and ε' of sapphire.....	21
Figure 11 – Measurement apparatus for cut-off waveguide method.....	22
Figure 12 – Frequency response for the empty cavity with dimensions of $d = 7$ mm and $h = 31$ mm	24
Figure 13 – Correction term $\Delta\varepsilon/\varepsilon_a$	26
Figure 14 – Correction terms $\Delta A/A$ and $\Delta B/B$	27

Figure 15 – Measurement apparatus for temperature coefficient of relative permittivity	28
Figure 16 – Mode chart of TE_{011} and TE_{013} modes for an empty cavity	29
Figure A.1 – Error on ε' caused by air gap between dielectric specimen and upper conducting plates	30
Table 1 – Diameter of conducting plate	10
Table 2 – Dimension of dielectric strip of NRD-guide	10
Table 3 – Dimensions of waveguide transducer	10
Table 4 – Dimensions of reference sapphire resonators and their partial electric energy filling factor P_e and geometric factor G	15
Table 5 – Diameter d of test specimens for 60 and 77 GHz measurement. Height h is fixed to 2,25 mm and 1,80 mm for 60 GHz and 77 GHz measurement, respectively	17
Table 6 – Measurement results of σ_r of conducting plates	20
Table 7 – Measurement results of ε' and $\tan \delta$ of sapphire and PTFE specimen	20
Table 8 – Recommended dimensions for conducting cylinder	23

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61338-1-4:2005

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

WAVEGUIDE TYPE DIELECTRIC RESONATORS –**Part 1-4: General information and test conditions –
Measurement method of complex relative permittivity for
dielectric resonator materials at millimetre-wave 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 provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with an IEC Publication.
- 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 61338-1-4 has been prepared by IEC Technical committee 49: Piezoelectric and dielectric devices for frequency control and selection.

This bilingual version (2014-02) corresponds to the monolingual English version, published in 2005-11.

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

FDIS	Report on voting
49/748/FDIS	49/751/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.

The French version of this standard has not been voted upon.

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

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 millimetre-wave frequency
- Part 2: Guidelines for oscillator and filter applications
- Part 4: Sectional specification
- Part 4-1: Blank detail specification

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

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

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

WAVEGUIDE TYPE DIELECTRIC RESONATORS –

Part 1-4: General information and test conditions – Measurement method of complex relative permittivity for dielectric resonator materials at millimetre-wave frequency

1 Scope and object

This part of IEC 61338 describes the measurement method of dielectric properties for dielectric resonator materials at millimetre-wave frequency.

This standard consists of two measurement methods: a) the dielectric rod resonator method excited by NRD-guide (Non-Radiative Dielectric waveguide) and b) the cut-off waveguide method excited by coaxial cables with small loops.

- a) The dielectric rod resonator method excited by NRD-guide is similar to the dielectric rod resonator method given in IEC 61338-1-3. This method has the following characteristics:
 - a complete and exact mathematical solution of complex permittivity is given by computer software;
 - the measurement error is less than 0,3 % for ε' and less than $0,05 \times 10^{-4}$ for $\tan \delta$;
 - the applicable measuring ranges of complex permittivity for this method are as follows:

frequency:	$30 \text{ GHz} < f < 100 \text{ GHz}$;
relative permittivity:	$2 < \varepsilon' < 30$;
loss factor:	$10^{-6} < \tan \delta < 10^{-2}$.
- b) The cut-off waveguide method excited by coaxial cables with small loops uses a dielectric plate sample placed in a circular cylinder of the TE_{011} mode. This method has the following characteristics:
 - fringe effect is corrected using the correction charts on the basis of rigorous analysis;
 - the measurement error is less than 0,5 % for ε' and less than $0,05 \times 10^{-4}$ for $\tan \delta$;
 - the TCF is measured with high accuracy;
 - the applicable measuring ranges of dielectric properties for this method are as follows:

frequency:	$30 \text{ GHz} < f < 100 \text{ GHz}$;
relative permittivity:	$2 < \varepsilon' < 30$;
loss factor:	$10^{-6} < \tan \delta < 10^{-2}$.

2 Normative references

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

IEC 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*

3 Measurement parameter

The measuring parameters are defined as follows:

$$\dot{\varepsilon}_r = \varepsilon' - j\varepsilon'' = D / (\varepsilon_0 E) \quad (1)$$

$$\tan \delta = \varepsilon'' / \varepsilon' \quad (2)$$

$$TC\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_{\text{ref}}} \frac{\varepsilon_T - \varepsilon_{\text{ref}}}{T - T_{\text{ref}}} \times 10^6 \quad (1 \times 10^{-6}/\text{K}) \quad (3)$$

$$TCF = \frac{1}{f_{\text{ref}}} \frac{f_T - f_{\text{ref}}}{T - T_{\text{ref}}} \times 10^6 \quad (1 \times 10^{-6}/\text{K}) \quad (4)$$

where

D is the electric flux density;

E is the electric field strength;

ε_0 is the permittivity in a vacuum;

$\dot{\varepsilon}_r$ is the complex relative permittivity;

ε' and ε'' are the real and imaginary components of the complex relative permittivity $\dot{\varepsilon}_r$;

$TC\varepsilon$ is the temperature coefficient of relative permittivity, and TCF being the temperature coefficient of resonance frequency;

ε_T and ε_{ref} are the real parts of the complex relative permittivity at temperature T and reference temperature T_{ref} ($T_{\text{ref}} = 20^\circ\text{C}$ to 25°C), respectively;

f_T and f_{ref} are the resonance frequency at temperature T and T_{ref} , respectively.

The TCF is related to $TC\varepsilon$ by the following equation:

$$TCF = -\frac{1}{2}TC\varepsilon - \alpha \quad (5)$$

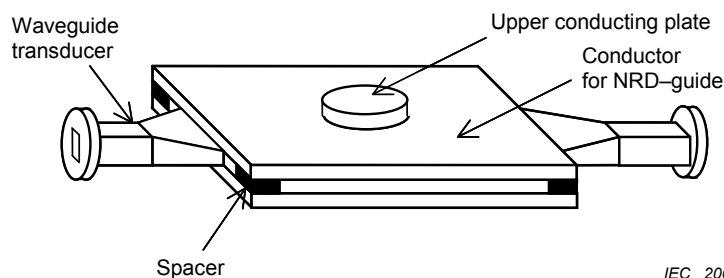
where α is the coefficient of thermal expansion of the dielectric specimen.

It should be noted that this equation is satisfied when the 100 % of electro-magnetic energy in the measuring resonance mode is concentrated inside the dielectric specimen. In the actual case, TCF deviates by several $10^{-6}/\text{K}$ from the calculated value, because some portion of electro-magnetic energy is stored outside the dielectric specimen.

Figure 1 – Schematic diagram of measurement equipment

b) Measurement apparatus

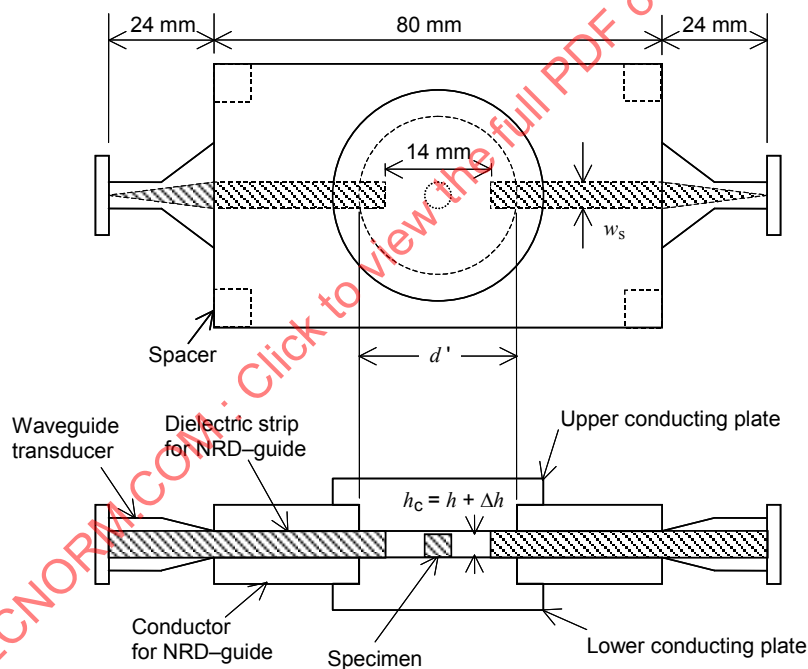
Figure 2a shows a configuration of measuring apparatus of dielectric rod resonator method excited by NRD-guide. Figure 2b shows a cross-sectional view of the apparatus for measuring ε' and $\tan \delta$ of a dielectric specimen with height h and d . The dielectric specimen is placed at the centre of the apparatus between two parallel conducting plates, and coupled to input and output NRD-guides. There remains a small air gap Δh between the dielectric specimen and the upper conducting plate. For $\Delta h < 50 \mu\text{m}$, the air gap can be neglected for the calculation of ε' (see Annex A).



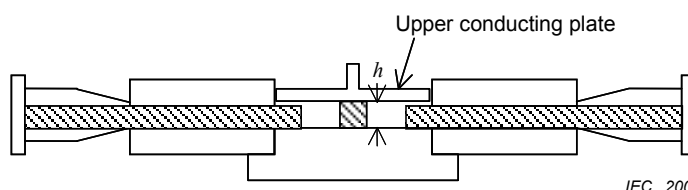
IEC 2004/05

Figure 2a – Configuration of apparatus

Dimensions in millimetres



IEC 2005/05

Figure 2b – Apparatus for ε' and $\tan \delta$ measurement

IEC 2006/05

Figure 2c – Apparatus for TCF and $TC\varepsilon$ measurement

Figure 2 – Measurement apparatus of dielectric rod resonator method excited by NRD-guide

Figure 2c shows an apparatus for measuring the temperature coefficient of resonance frequency TCF or that of relative permittivity $TC\varepsilon$. For this measurement, the upper conducting plate should be contacted to the dielectric specimen.

The height of dielectric strip for NRD-guide is designed to be smaller than height h of the dielectric specimen. The upper conducting plate is set gently to touch the top face of the specimen, so that an excessive pressure does not damage the surface of conducting plate.

As shown in Table 1, a diameter of the conducting plates in Figure 2b is determined by the diameter of dielectric specimen. In this measurement method, the ε' and $\tan \delta$ are calculated under the condition that the conducting plates have an infinitely large diameter. As actual conducting plates have a finite diameter, a part of electro-magnetic energy leaks outward the conducting plates. Although this leaky energy shifts the resonance frequency and decreases the unloaded Q , its contribution is negligibly small under the condition of $d'/d > 5$.

Table 2 shows the example of dimensions for dielectric strips of NRD-guide in Figure 2b. Dielectric strips of the NRD-guide are made of PTFE or cross-linked styrene copolymer.

Figure 3 shows a waveguide transducer that connects the measuring apparatus to the measurement equipment with WR-15 or WR-10 waveguides. Table 3 shows the dimensions of the waveguide transducers. As shown in Figure 2b, the end of the dielectric strip of the NRD-guide is sharpened in the transducer.

Table 1 – Diameter of conducting plate

Diameter d'	$d' = 5d \sim 10d$ d : diameter of dielectric specimen
Material of conducting plate	Copper or silver is recommended

Table 2 – Dimension of dielectric strip of NRD-guide

Material	Measurement frequency range GHz	Height h_s mm	Width w_s mm
PTFE ($\varepsilon' = 2,0$)	55 to 65	2,25	2,50
	75 to 80	1,80	1,90
Cross-linked styrene Copolymer ($\varepsilon' = 2,5$)	55 to 65	2,25	2,00
	75 to 80	1,80	1,60

Table 3 – Dimensions of waveguide transducer

Waveguide	Frequency range GHz	h_{wg} mm	w_{wg} mm	h_s mm
WR-15	55 to 65	3,80	1,90	2,25
WR-10	75 to 80	2,54	1,27	1,80

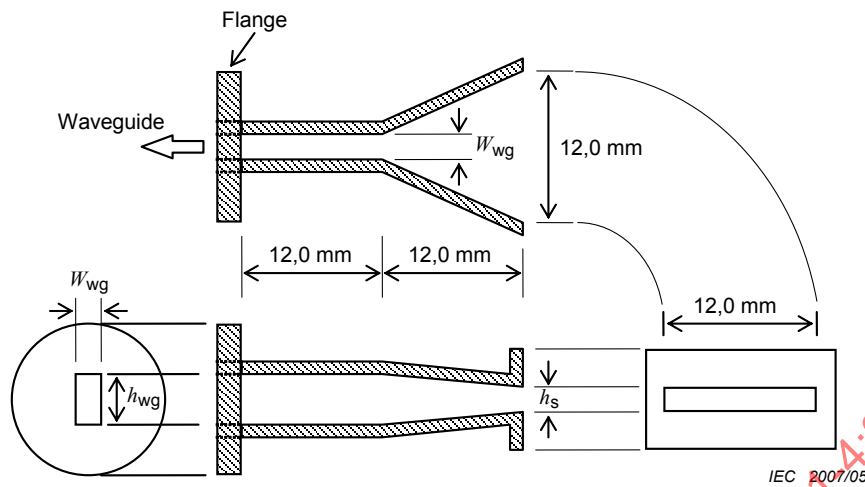


Figure 3 – Waveguide transducer from NRD-guide to waveguide

4.2 Theory and calculation equations

4.2.1 Measurement of relative permittivity and loss factor

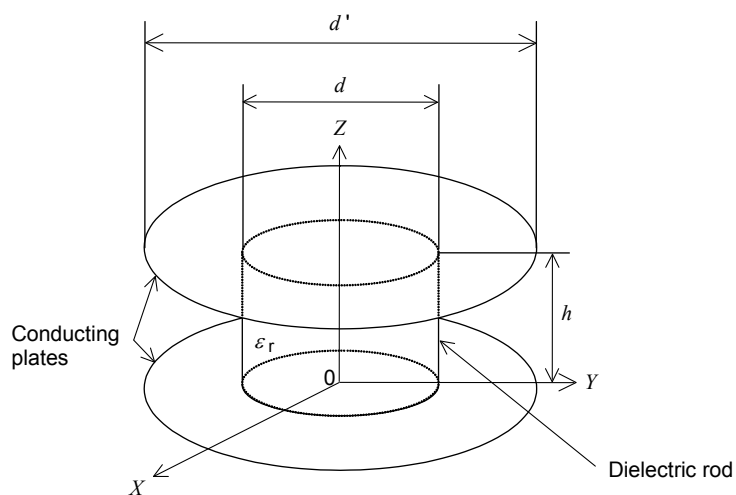
Figure 4 shows a configuration of the TE_{0m1} mode resonator. The cylindrical dielectric specimen is short-circuited at both ends by the two parallel conducting plates. The values ϵ' and $\tan \delta$ of the dielectric resonator are calculated from the resonance frequency f_0 and unloaded quality factor Q_u measured for the TE_{0m1} resonance mode. It is recommended to use the TE_{011} , TE_{021} and TE_{031} resonance modes for the materials with $\epsilon' = 2$ to 4, 4 to 20 and 20 to 30, respectively.

The resonance wavelength λ_0 in free space and the guiding wavelength λ_g in the dielectric transmission line are given by the following equations:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0}, \quad \lambda_g = 2h \quad (6)$$

where c is the velocity of light in a vacuum ($c = 2,997\,9 \times 10^8$ m/s).

As described in 4.1b), the air gap Δh can be neglected for the calculation of ϵ' and $\tan \delta$ in the case of $\Delta h < 50 \mu\text{m}$. So, the height h is used in equation (6).



IEC 2008/05

Figure 4 – Configuration of a cylindrical dielectric rod resonator short-circuited at both ends by two parallel conducting plates

The value v^2 is calculated from λ_0 and λ_g :

$$v^2 = \left(\frac{\pi d}{\lambda_0} \right)^2 \left[\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_g} \right)^2 - 1 \right] \quad (7)$$

Using the value v^2 , the value u^2 is calculated:

$$u \frac{J_0(u)}{J_1(u)} = -v \frac{K_0(v)}{K_1(v)} \quad (8)$$

where $J_n(u)$ is the Bessel function of the first kind and $K_n(v)$ is the modified Bessel function of the second kind. For any value of v , the m -th solution u exists between u_{0m} and u_{1m} , where $J_0(u_{0m}) = 0$ and $J_1(u_{1m}) = 0$. The first, second and third solution of $m = 1, 2$ and 3 are shown in Figure 5.

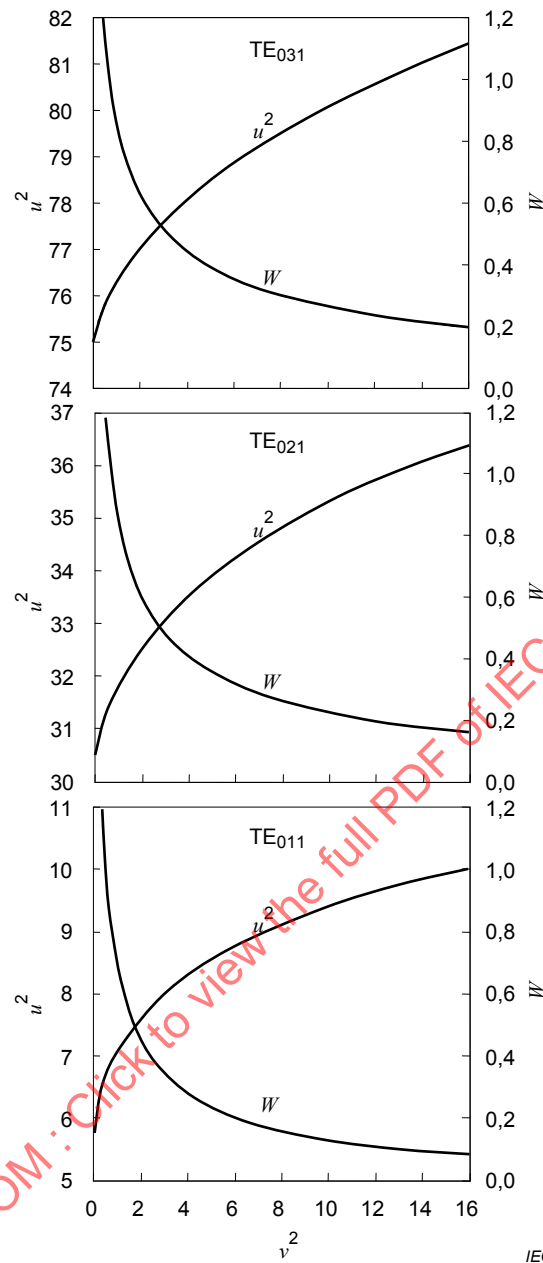


Figure 5 –Calculations of u^2 and W as a function of v^2 for TE₀₁₁, TE₀₂₁ and TE₀₃₁ resonance modes

The relative permittivity ε' is calculated by the following equation using the values v^2 and u^2 :

$$\varepsilon' = \left(\frac{\lambda_0}{\pi d} \right)^2 (u^2 + v^2) + 1 \quad (9)$$

By using the measured unloaded Q , Q_u , the loss factor $\tan \delta$ is calculated:

$$\tan \delta = \frac{A}{Q_u} - BR_S = \frac{A}{Q_u} - \frac{B'}{\sqrt{\sigma_r}} \quad (10)$$

where

$$R_S(\Omega) = \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu}{\sigma}} = \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu}{\sigma_0 \sigma_r}} \quad (11)$$

$$A = 1 + \frac{W}{\varepsilon'} \quad (12)$$

$$B = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_g} \right)^3 \frac{1+W}{30\pi^2 \varepsilon'}, \quad B' = B \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu}{\sigma_0}} \quad (13)$$

$$W = \frac{J_1^2(u)}{K_1^2(v)} \cdot \frac{K_0(v)K_2(v) - K_1^2(v)}{J_1^2(u) - J_0(u)J_2(u)} \quad (14)$$

Here, R_S is the surface resistance of the conducting plates and σ is the conductivity of the conducting plates. The relative conductivity σ_r is defined as $\sigma = \sigma_0 \sigma_r$, where σ_0 is the conductivity of the international standard annealed copper ($\sigma_0 = 5,8 \times 10^7$ S/m at 20 °C). μ is the permeability of conducting plates which has the value of $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m for non-magnetic conductors such as Cu or Ag.

The $\tan \delta$ is calculated by using R_S and B or, σ_r and B' . As σ_r is independent of frequency and being a good indicator for the degradation level of conductivity caused by the surface roughness or oxidation on conducting plates, σ_r is conveniently used.

The function W/ε' equals the ratio of electric-field energy stored outside to inside of the dielectric specimen. The W equals zero when 100 % electric-field energy is concentrated inside the specimen. The calculated results of W against v for the TE_{011} , TE_{021} and TE_{031} resonance modes are shown in Figure 5.

4.2.2 Relative conductivity of conducting plates

The value of σ_r or R_S of the conducting plates is determined in advance of the calculation for the $\tan \delta$ of dielectric specimens. The measurement accuracy of σ_r has vital importance on the accuracy of $\tan \delta$, because A/Q_u and $B'/\sqrt{\sigma_r}$ in equation (10) have the same order of magnitude for $\tan \delta$ of 10^{-4} .

Figure 6 shows a configuration of the apparatus to measure the σ_r of conducting plates. Two single crystal sapphires with the TE_{021} and $TE_{02\delta}$ resonance modes are used for measuring the σ_r . The sapphires used as reference resonators have low $\tan \delta$ at millimetre-wave frequency and have the same ε' and $\tan \delta$. The axis of each rod is parallel to C-axis. The dimensions of the TE_{021} and $TE_{02\delta}$ resonance modes are designed so that they have the same resonance frequency. Table 4 shows the dimensions of sapphires for the resonance frequency of 60 GHz and 77 GHz.

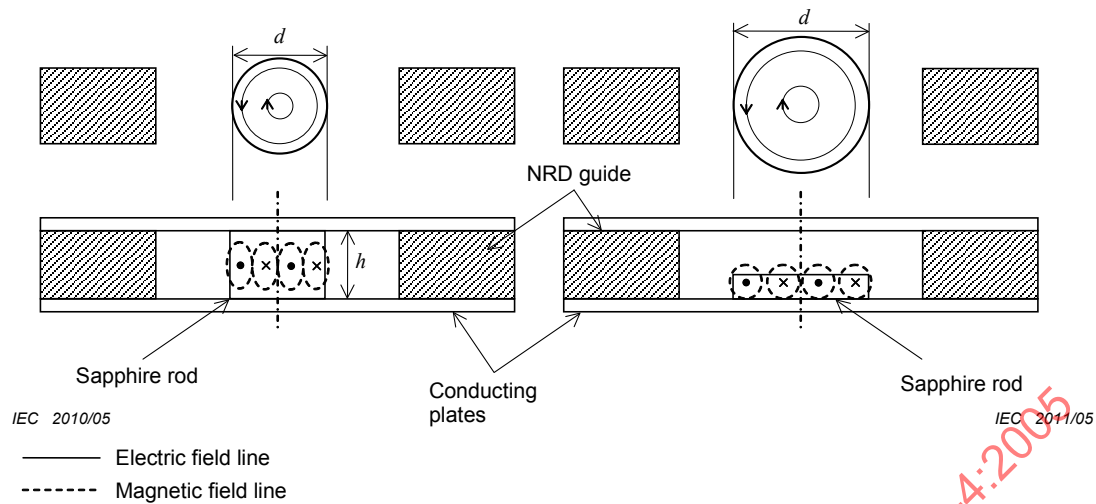
Figure 6a – TE₀₂₁ mode resonatorFigure 6b – TE_{02δ} mode resonator

Figure 6 – Configuration of reference dielectric resonator for measurement of σ_r of conducting plates

Table 4 – Dimensions of reference sapphire resonators and their partial electric energy filling factor P_e and geometric factor G

	TE ₀₂₁				TE _{02δ}			
f_0 GHz	d mm	h mm	P_{e1}	G_1 Ω	d mm	h mm	$P_{e\delta}$	G_δ Ω
60	3,14	2,25	0,915	1 182	4,49	0,80	0,906	409
77	2,42	1,80	0,901	1 208	3,60	0,60	0,894	382

NOTE 1 Specifications for sapphire rod are as follows:

$\varepsilon' = 9,4$, flatness: $< 0,005$ mm, roughness of both ends: $R_a < 0,01$ μm , roughness of side of rod: $R_a < 1$ μm , perpendicular: $< 0,1^\circ$, axis: parallel to c-axis $< 0,3^\circ$.

NOTE 2 Values $P_{e\delta}$ and G_δ are effective for the standard sapphire rod having the tolerance of ε' to be $9,4 \pm 0,1$ and the dimensional tolerance of d and h to be $\pm 0,1$ mm, respectively.

As shown in Figure 6, the TE_{02δ} mode resonator has a larger d/h ratio. The electromagnetic field of this mode is more concentrated near the surface of the lower conductor compared with the TE₀₂₁ mode resonator. The different contribution of conductor loss on unloaded Q_u for each resonator enables the calculation of σ_r . High accuracy on σ_r is obtained by enlarging the difference of the Q_u values between the TE₀₂₁ and TE_{02δ} mode resonators.

The resonance frequency and unloaded Q for the TE₀₂₁ and TE_{02δ} mode resonators are noted by using the subscripts 1 and δ : f_{01} and Q_{u1} for the TE₀₂₁ resonator, $f_{0\delta}$ and $Q_{u\delta}$ for the TE_{02δ} resonator. The reference TE₀₂₁ and TE_{02δ} resonators have the same resonance frequency $f_{01} = f_{0\delta}$, and different unloaded Q , ($Q_{u1} > Q_{u\delta}$). The value σ_r at the resonance frequency $f_{01} = f_{0\delta}$ is given by the following equation:

$$\sigma_r = \sigma / \sigma_0 = \frac{\pi \mu f_0}{\sigma_0} \left[\frac{Q_{u1} Q_{u\delta}}{G_1 G_\delta} \cdot \frac{G_1 P_{e1} - G_\delta P_{e\delta}}{Q_{u1} P_{e1} - Q_{u\delta} P_{e\delta}} \right]^2 \quad (15)$$

where P_{e1} and $P_{e\delta}$ are the partial electric energy filling factors of the reference TE_{021} and $TE_{02\delta}$ resonators, respectively. G_1 and G_δ being the geometric factors for each reference resonators. Calculated values of P_e and G for the reference sapphire resonators with $\varepsilon' = 9,4$ are given in Table 4. These values are applicable when the actual dimensions agree with the designed dimensions within the deviation of 0,01 mm. The derivation of equation (15) and the formulas for P and G are given in Annex B.

NOTE 3 Loss factor of reference resonators is calculated by the following equation if needed.

$$\tan \delta_1 = \tan \delta_\delta = \frac{1}{Q_{u1}Q_{u\delta}} \cdot \frac{G_1Q_{u\delta} - G_\delta Q_{u1}}{G_1P_{e1} - G_\delta P_{e\delta}} \quad (16)$$

4.2.3 Temperature coefficient of resonance frequency and relative permittivity

The temperature coefficient of resonance frequency TCF is given by measuring the resonance frequency at temperature T and reference temperature T_{ref} using equation (4). In the same way, temperature coefficient of relative permittivity $TC\varepsilon$ is given by calculating relative permittivity at temperature T and reference temperature T_{ref} using equation (3).

A dielectric material generally has nonlinear dependence of relative permittivity on temperature. A procedure to deal with this non-linear temperature dependence of resonance frequency or relative permittivity is described in IEC 61338-1-3.

4.2.4 Temperature dependence of loss factor

The temperature dependence of $\tan \delta$ is given by measuring the $\tan \delta$ at various temperatures. For the calculation of $\tan \delta$ at each temperature, the temperature dependence of σ_r is needed. The temperature dependence of conductivity for the annealed copper in conformity with the international standard is given as follows.

$$\sigma_0(T) = \frac{5,8 \times 10^7}{1 + 3,93 \times 10^{-3}(T - 20)} \quad (\text{S/m}) \quad (17)$$

When the σ_r at reference temperature T_{ref} is measured, one can use following equation for as the first order approximation of σ_r at temperature T .

$$\sigma_r(T) = \frac{\sigma_r}{1 + 3,93 \times 10^{-3}(T - T_{ref})} \quad (\%) \quad (18)$$

4.3 Measurement procedure

The preparation of dielectric specimens and measurement procedure are as follows:

a) Preparation of reference sapphire resonator

Prepare the reference sapphire resonators with the dimensions shown in Table 4. In order to minimize the measurement error on σ_r of the conducting plates, their c-axes shall be parallel to z-direction, and both ends of the rod shall be polished parallel to each other and perpendicular to c-axis.

b) Preparation of test specimens

The TE₀₁₁ mode dielectric resonators have very small dimensions for the measurement at millimetre-wave frequency. It is preferable to use the TE₀₂₁ or TE₀₃₁ resonance modes especially for measuring the high- ϵ' materials. Table 5 shows recommended diameters for the materials with ϵ' from 2 to 40. The height h is fixed to 2,25 mm and 1,80 mm for the measurement at 60 GHz and 77 GHz, respectively. Figures 7 and 8 show the diameter d of the TE₀₁₁, TE₀₂₁ and TE₀₃₁ mode resonators with resonance frequencies 60 GHz and 77 GHz, respectively.

Table 5 – Diameter d of test specimens for 60 and 77 GHz measurement. Height h is fixed to 2,25 mm and 1,80 mm for 60 GHz and 77 GHz measurement, respectively

ϵ'	d (mm) $f_0 = 60$ GHz			d (mm) $f_0 = 77$ GHz		
	TE ₀₁₁	TE ₀₂₁	TE ₀₃₁	TE ₀₁₁	TE ₀₂₁	TE ₀₃₁
2,0	5,05	-		3,68		
2,5	3,80	-		2,83		
3,0	3,16	-		2,38		
3,5	2,75	-		2,08		
4,0	2,47	5,49		1,88	4,20	
5,0	-	4,67			3,59	
6,0	-	4,14			3,19	
8,0	-	3,45			2,67	
10,0	-	3,02			2,34	
12,0		2,72			2,11	
14,0		2,50			1,93	
16,0		2,32			1,80	
18,0		2,17			1,69	
20,0		2,05	3,21		1,59	2,49
25,0			2,85			2,21
30,0			2,58			2,01
35,0			2,38			1,85
40,0			2,22			1,73

c) Preparation of measurement apparatus

Set up the measurement equipment and apparatus as shown in Figures 1 and 2. All measurement equipments, apparatus and dielectric specimens shall be kept in a clean, dry state as high humidity degrades unloaded Q . The relative humidity is preferable to be less than 60 %.

d) Measurement of reference level

Measure the through level of transmission power, reference level. Connect the input and output NRD-guides with a dielectric strip, the length of which is 14 mm, and the height h_s and width W_s shown in Table 2. Measure the through transmission power level over the measurement frequency range.

e) Measurement of conductivity of the conducting plates

Connect the measurement apparatus as shown in Figure 6. Insert the TE_{021} sapphire resonator at the center of the conducting plates and adjust the distance between resonator and NRD-guide strip.

Figure 9 shows an example of the TE_{021} mode resonance peak. The identification of this peak is relatively easy, since the TM or hybrid resonance modes are suppressed in the resonator excited by the NRD-guide. This peak is identified as it shifts downward in frequency when the upper plate separates slowly from top face of the resonator.

Adjust the insertion attenuation IA_0 (dB) of the resonance peak to be from 15 dB and 30 dB from the reference level by changing the distance between sapphire resonators and NRD-guide strip. Measure the f_{01} and the half-power band-width Δf of the TE_{021} mode resonator. Calculate the unloaded Q, Q_{u1} , using the following equation.

$$Q_u = \frac{f_0 / \Delta f}{1 - 10^{-IA_0/20}} \quad (19)$$

In a similar way, insert the $TE_{02\delta}$ mode sapphire resonator in the apparatus and measure the $f_{0\delta}$ and $Q_{u\delta}$.

In order to improve the measurement accuracy of σ_r , repeat this measurement several times for the TE_{021} and $TE_{02\delta}$ mode resonators. Using the mean values of f_{01} , Q_{u1} , $f_{0\delta}$ and $Q_{u\delta}$, calculate σ_r using equation (15). As the σ_r of the conducting plates degrades day by day due to wear or oxidation of the metal surface, this measurement shall be repeated every time prior to the measurement of test specimens. It is preferable to polish the surface of the conducting plates when the σ_r degrades more than 10 %.

f) Measurement of complex permittivity of test specimen

In a similar way, measure the f_0 and Q_u of the TE_{0m1} resonance mode of the test specimens. Calculate their ϵ' and $\tan \delta$ from equation (10).

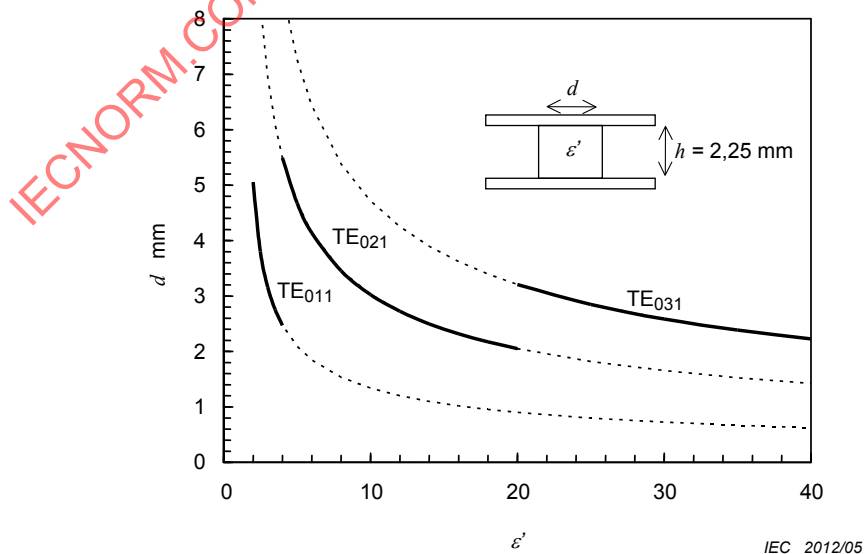


Figure 7 – Diameter d of TE_{011} , TE_{021} and TE_{031} mode resonators with resonance frequency of 60 GHz

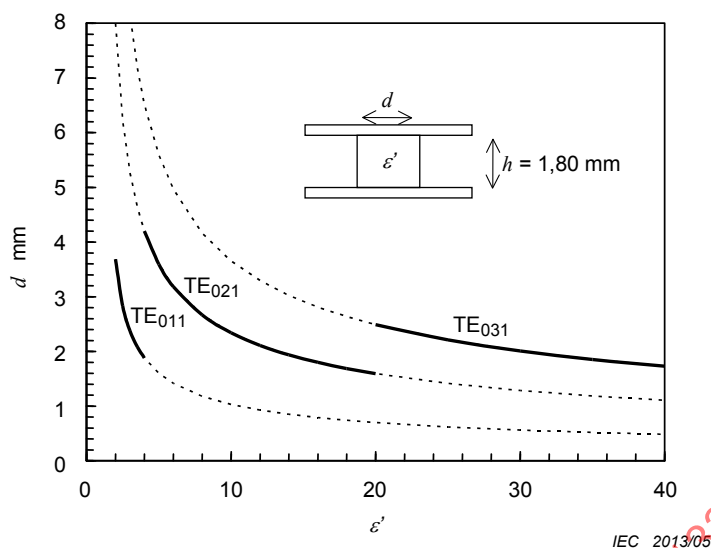


Figure 8 – Diameter d of TE_{011} , TE_{021} and TE_{031} mode resonators with resonance frequency of 77 GHz

4.4 Example of measurement result

a) Measurement result of σ_r of conducting plates

Table 6 shows a measurement result of σ_r of conducting plates at 60 GHz. The reference sapphire resonators with dimensions of 3,13 mm × 2,25 mm and 4,49 mm × 0,87 mm were used for the measurement. The height $h_C = 2,279$ mm of the apparatus was used for the calculation of σ_r . The measurement errors are shown in each column using the term “±”.

b) Measurement results of ϵ' and $\tan \delta$

Table 7 shows the measurement results of ϵ' and $\tan \delta$ at 57 GHz. Sapphire and PTFE were used as the test specimens. The values $\sigma_r = 80,5$ % and $h_C = 2,323$ were used for the calculation.

c) Measurement results of TCF and $TC\epsilon$

Figure 10 shows a measurement result of temperature dependence for resonance frequency and relative permittivity of sapphire crystal at 60 GHz.

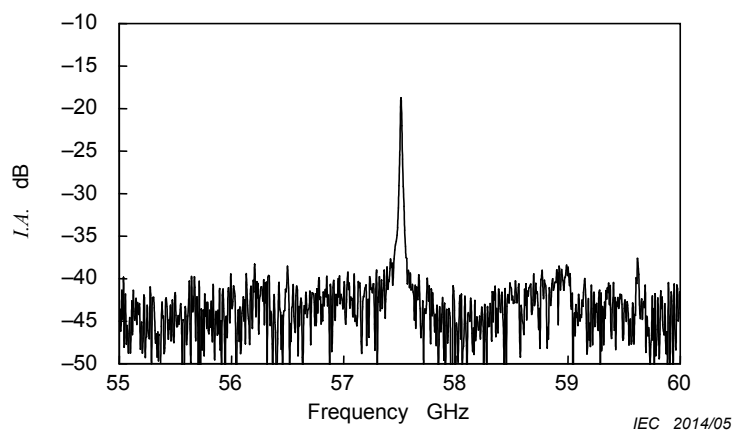


Figure 9 – Example of TE₀₂₁ mode resonant peak

Table 6 – Measurement results of σ_r of conducting plates

Reference resonators (Mode)	d mm	h mm	P_e	G	f_0 GHz	IA_0 dB	Q_u	σ_r %	$\tan \delta$ 10^{-5}
Sapphire (TE ₀₂₁)	3,130 $\pm 0,005$	2,250 $\pm 0,001$	0,910	1 197	59,876 $\pm 0,008$	19,0 $\pm 1,0$	8 782 ± 119	87 ± 4	6,2 $\pm 0,3$
Sapphire (TE ₀₂₈)	4,490 $\pm 0,004$	0,807 $\pm 0,001$	0,907	413	59,692 $\pm 0,047$	19,0 $\pm 0,3$	4510 ± 50		

Temperature: 20 °C, Humidity: 50 %

Table 7 – Measurement results of ε' and $\tan \delta$ of sapphire and PTFE specimen

Specimen	Mode	d mm	h mm	f_0 GHz	IA_0 dB	Q_u	ε'	$\tan \delta$ 10^{-5}
Sapphire -1	TE ₀₂₁	3,276 $\pm 0,001$	2,269 $\pm 0,001$	57,540 $\pm 0,003$	21,6 $\pm 0,1$	8 868 ± 14	9,417 $\pm 0,005$	5,80 $\pm 0,05$
Sapphire -2	TE ₀₂₁	3,277 $\pm 0,001$	2,261 $\pm 0,001$	57,528 $\pm 0,010$	21,7 $\pm 0,1$	8 972 ± 40	9,416 $\pm 0,007$	5,65 $\pm 0,06$
PTFE -1	TE ₀₁₁	5,456 $\pm 0,005$	2,267 $\pm 0,002$	56,610 $\pm 0,010$	20,5 $\pm 0,1$	2 820 ± 12	2,065 $\pm 0,002$	18,8 $\pm 0,2$
PTFE -2	TE ₀₁₁	5,443 $\pm 0,004$	2,266 $\pm 0,002$	56,640 $\pm 0,013$	20,1 $\pm 0,1$	2 816 ± 14	2,066 $\pm 0,002$	18,9 $\pm 0,3$

Temperature: 25 °C, Humidity: 50 %

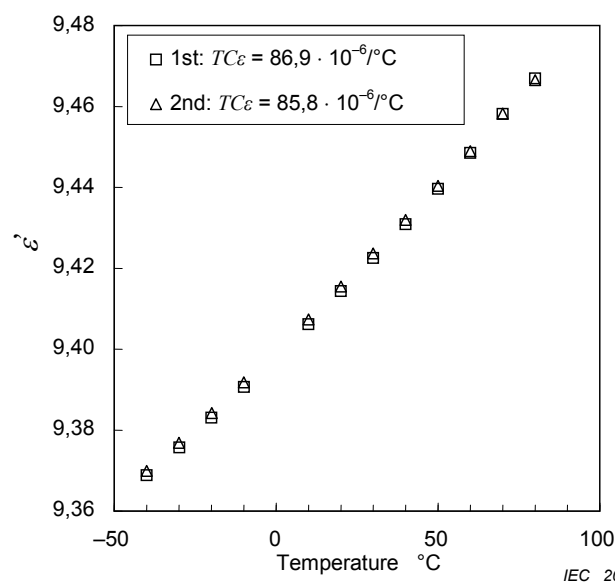


Figure 10a – Resonance frequency

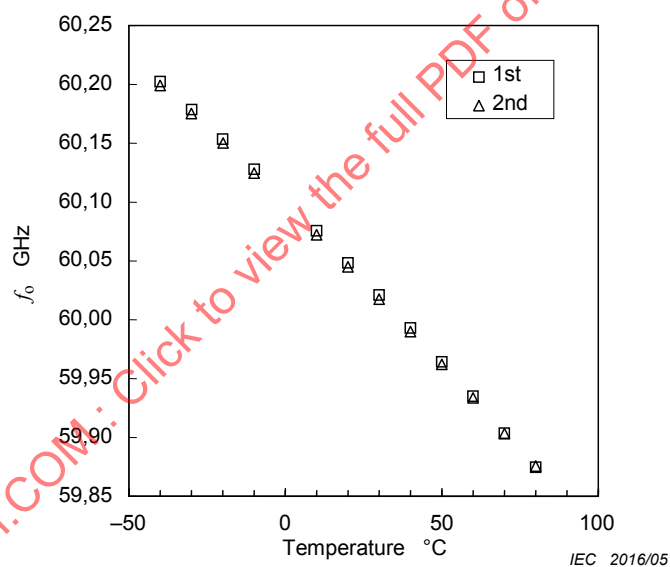


Figure 10b – Relative permittivity

Figure 10 – Measurement result of temperature dependence of f_0 and ε' of sapphire

5 Cut-off waveguide method excited by coaxial cables with small loops

5.1 Measurement equipment and apparatus

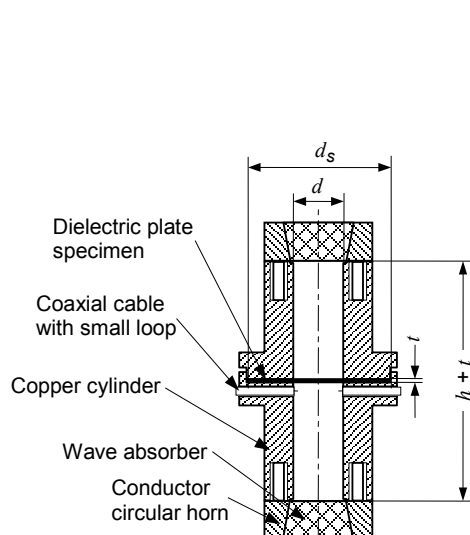
The measurement equipment and apparatus are as follows:

a) Measurement equipment

The same measurement equipment used for the dielectric rod resonator method is used for the cut-off waveguide method (Figure 1). For the measurement of dielectric properties, 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.

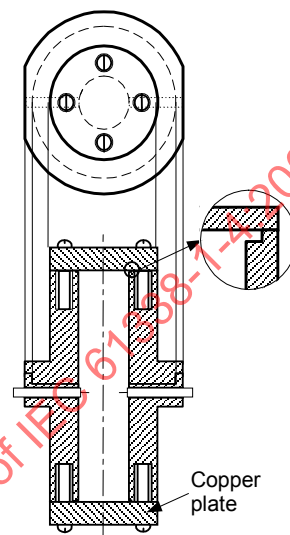
b) Measurement apparatus

Figure 11a shows an apparatus for measuring the complex permittivity of dielectric specimen. The components of the apparatus are the conducting cylinder that is cut into two parts at the middle of the height, two electro-magnetic wave absorbers on the top and bottom of the cylinder, and two semi-rigid cables with small loops. A dielectric plate specimen with diameter d_s and thickness t is placed at the middle of the cylinder and clamped by clips.



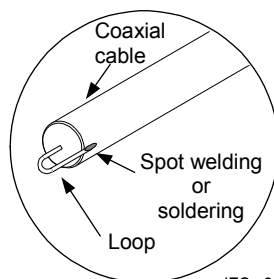
IEC 2017/05

Figure 11a – Conducting cylindrical resonator clamping a dielectric specimen



IEC 2018/05

Figure 11b – Empty cavity



IEC 2019/05

Figure 11c – Exciting coaxial cable with small loop



IEC 2020/05

Figure 11d – Reference line for calibration with total length of two coaxial exciting cables

Figure 11 – Measurement apparatus for cut-off waveguide method

For the conducting cylinder, high conductivity metals such as copper or copper-plated metals, which plating thickness should be greater than 3 μm , are generally used. The inner surface of the cylinder is preferable to be polished to a mirror-like sheen with a surface roughness less than 0,1 μm .

The dimensions d , h and surface resistance of the conducting cylinder are measured by using an empty cavity shown in Figure 11b. Here, the dielectric specimen and electro-magnetic wave absorbers are removed from the conducting cylinder, and two copper plates are attached at the top and bottom of the cylinder.

Figure 11c shows a small loop at the end of each semi-rigid cable. The plane of the loop is set parallel to that of the dielectric substrate. The recommended type of semi-rigid cable is UT-47 or UT-34 with outer diameters of 1,2 mm or 0,9 mm, respectively.

The distance between two cables is adjusted for the insertion attenuation (IA_0) to be around 30 dB. Lower IA_0 (<20 dB) increases the field disturbance in the measurement mode, and higher IA_0 (> 40 dB) increases the thermal noise of the network analyzer excessively.

Figure 11d shows a reference semi-rigid cable used for the calibration of full transmission power level, i.e. the reference level. The length of this cable is equal to the sum of two semi-rigid cables.

Table 8 shows recommended dimensions of inner diameter d and height h of the conducting cylinder for the measurement at 50 GHz or 80 GHz frequencies. These dimensions are determined so that the resonance frequencies of the TE_{011} and TE_{013} mode have not those of the other resonance modes near by.

The dielectric specimen is prepared to have the diameter d_s greater than 1,2 d ($d_s \geq 1,2d$) and the thickness t .

Table 8 – Recommended dimensions for conducting cylinder

Frequency	d mm	h mm
50 GHz	7,0	31,0
	7,0	23,0
80 GHz	4,5	19,9
	4,5	15,3

5.2 Theory and calculation equations

5.2.1 Dimension of dielectric specimen and relative conductivity of conducting cylinder: d , h , σ_r

In advance with the measurements of ε' and $\tan \delta$ for dielectric specimen, the dimensions d , h and relative conductivity σ_r of the conducting cylinder are measured. Measurement of dimensions by micrometer often causes the errors depending on measuring points. The effective dimensions for d and h are obtained precisely by measuring the resonance frequencies of the TE_{011} and TE_{013} modes using the empty cavity (Figure 11b).

Figure 12 shows an example of frequency responses for the empty cavity with dimensions $d = 7$ mm and $h = 31$ mm. The resonance frequencies f_{01} and f_{03} of the TE_{011} and TE_{013} resonance modes are measured, respectively. The dimensions d and h of this empty cavity are given as follows:

$$d = \frac{cj'_{01}}{\pi} \sqrt{\frac{8}{9f_{01}^2 - f_{03}^2}} \quad (20)$$

$$h = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{8}{f_{03}^2 - f_{01}^2}} \quad (21)$$

where c is the velocity of light and j'_{01} is the first root of its derivative of the Bessel function of the first kind, $j'_0(j_{01}) = 0$ ($c = 2,9979 \times 10^8$ m/s and $j'_{01} = 3,871\ 7$).

The relative conductivity of the conducting cylinder is given by measuring the unloaded Q , Q_{u1} , of the TE_{011} resonance mode of the empty cavity. The surface resistance R_S is given by the following equation:

$$R_S = \frac{\pi \sqrt{30\mu_0 f_0 d \left\{ j'_{01}{}^2 + \left(\frac{\pi d}{2h} \right)^2 \right\}^{\frac{5}{2}}}}{Q_{u1} \left\{ j'_{01}{}^2 + 2\pi^2 \left(\frac{d}{2h} \right)^3 \right\}} \quad (22)$$

where μ_0 is the permittivity in a vacuum ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m).

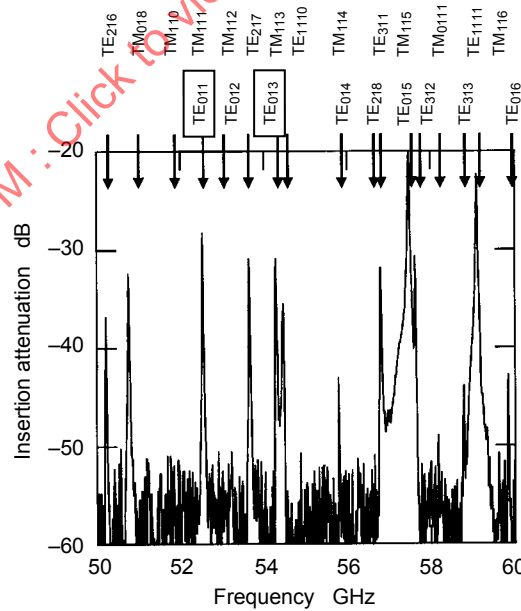


Figure 12 – Frequency response for the empty cavity with dimensions of $d = 7$ mm and $h = 31$ mm

The surface resistance R_S is the function of conductivity σ .

$$R_S = \sqrt{\pi f_0 \mu_0 / \sigma} \quad (23)$$

The relative conductivity σ_r of the conducting cylinder is defined as $\sigma = \sigma_0 \sigma_r$, where σ_0 is the conductivity of the universal standard copper ($\sigma_0 = 58 \times 10^6$ S/m). σ_r is given as follows:

$$\sigma_r = \frac{Q_u^2 \left\{ j_{01}'^2 + 2\pi^2 \left(\frac{d}{2h} \right)^3 \right\}^2}{30\pi\sigma_0 d \left\{ j_{01}'^2 + \left(\frac{\pi d}{2h} \right)^2 \right\}^{\frac{5}{2}}} \quad (24)$$

This value σ_r is conveniently used instead of R_S since this value is independent of frequency and indicates the degradation level of conductivity caused by the surface roughness or oxidation of copper cylinder.

5.2.2 Relative permittivity and loss factor of dielectric specimen: ϵ' , $\tan \delta$

The axially symmetric TE_{011} mode resonance is used for the measurement of ϵ' and $\tan \delta$ of dielectric specimen. The dielectric specimen with diameter d_s and thickness t is set as shown in Figure 11a. The resonance frequency f_0 and the unloaded quality factor Q_u of the TE_{011} resonance mode are measured.

The approximate relative permittivity ϵ_a is calculated first: The ϵ_a is the value neglecting the fringe effect at the cylinder-dielectric interface, where a radial cut-off waveguide is formed and the electro-magnetic wave decays rapidly along the radial direction.

From the measured values f_0 , d and t , the value Y is calculated:

$$Y = \frac{t}{2} \sqrt{k_r^2 - k_0^2} \quad (25)$$

where

$$k_0 = \frac{2\pi f_0}{c} \quad (26)$$

$$k_r = \frac{2j_{01}'}{d} \quad (27)$$

The value X is calculated from Y as follows:

$$X \tan \left(X + \frac{\pi}{2} \right) = Y \quad \left(\frac{\pi}{2} < X < \pi \right) \quad (28)$$

The value ε_a is given from X and Y .

$$\varepsilon_a = \left(\frac{c}{\pi f_0 t} \right)^2 (X^2 + Y^2) + 1 \quad (29)$$

By taking account of the fringe effect, the corrected relative permittivity ε' is given as follows:

$$\varepsilon' = \varepsilon_a \left(1 - \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_a} \right) \quad (30)$$

where the correction term $\Delta\varepsilon/\varepsilon_a$ is given from ε_a and t/d in Figure 13, which was calculated by the mode matching method.

The loss factor $\tan \delta$ taking account of the fringe effect is calculated from the following equation:

$$\tan \delta = \frac{A}{Q_u} \left(1 + \frac{\Delta A}{A} \right) - R_S B \left(1 + \frac{\Delta B}{B} \right) \quad (31)$$

where R_S is the surface resistance of the conducting cylinder, and values A and B are calculated from the following equations:

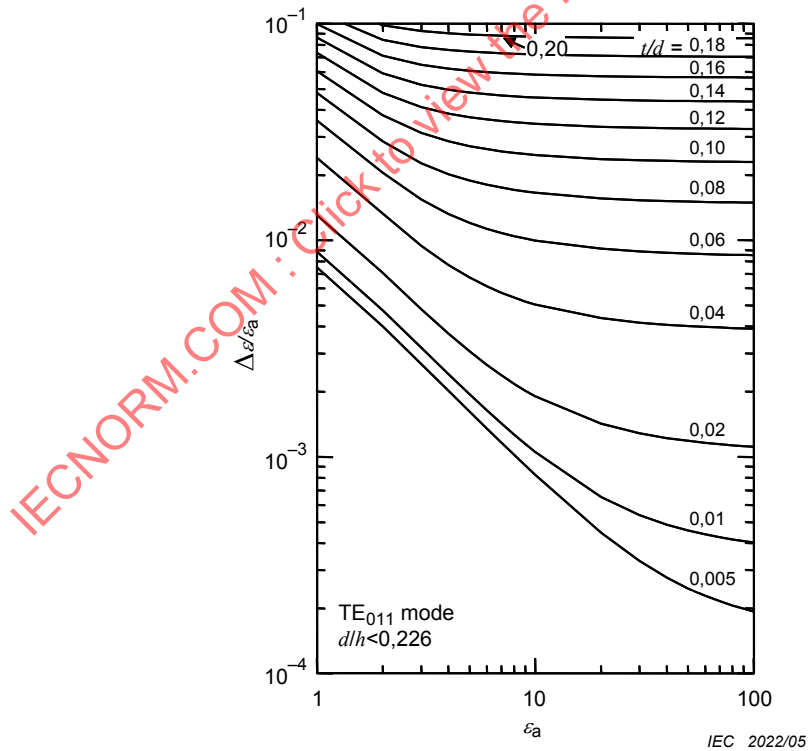


Figure 13 – Correction term $\Delta\varepsilon/\varepsilon_a$

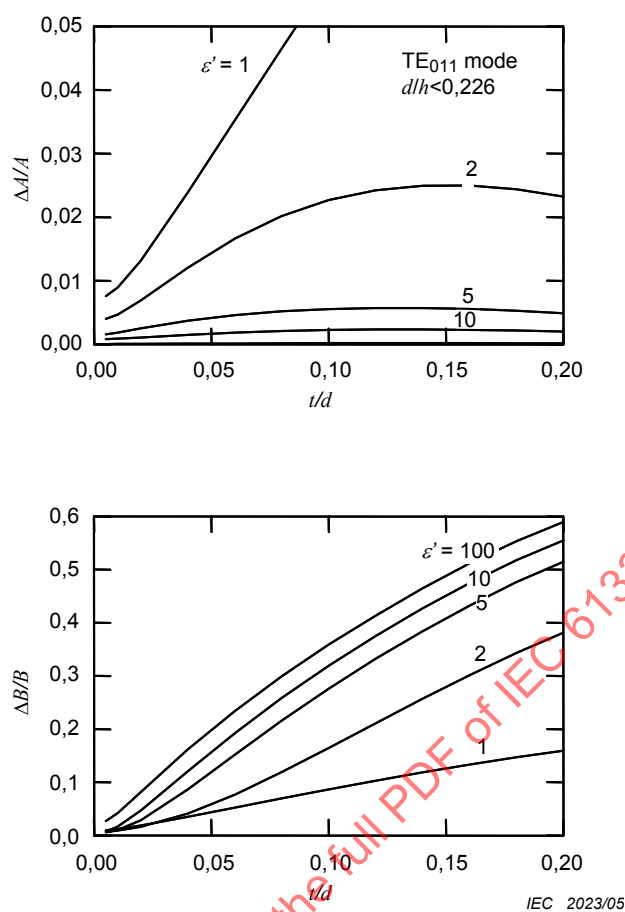


Figure 14 – Correction terms $\Delta A/A$ and $\Delta B/B$

$$W = \frac{\cos^2(X - \pi/2)}{Y + \sin^2(X - \pi/2)} \quad (32)$$

$$A = 1 + \frac{W}{\epsilon'} \quad (33)$$

$$B = \left(\frac{c j'_{01}}{\pi f_0 d} \right)^3 \frac{1 + W}{60 \pi j'_{01} \epsilon'} \quad (34)$$

The correction terms $\Delta A/A$ and $\Delta B/B$ in equation (31) are given from ϵ' and t/d in Figure 14, which was calculated by the mode matching method.

5.2.3 Temperature coefficient of relative permittivity: $TC\epsilon$

Figure 15 shows an apparatus for the measurement of temperature coefficient of relative permittivity. The conducting cylinder with dielectric specimen is set in the case. Upper head of the conducting cylinder is fixed by a spring that allows smooth thermal expansion of the conducting cylinder.

The apparatus is set in the oven, and ϵ' of dielectric specimen is measured at each temperature. Temperature coefficient of ϵ' is calculated from equation (3). If necessary, the temperature dependence of $\tan \delta$ is measured by calculating $\tan \delta$ at each temperature.

5.3 Measurement procedure

Measurement procedure is as follows:

a) Preparation of measurement apparatus

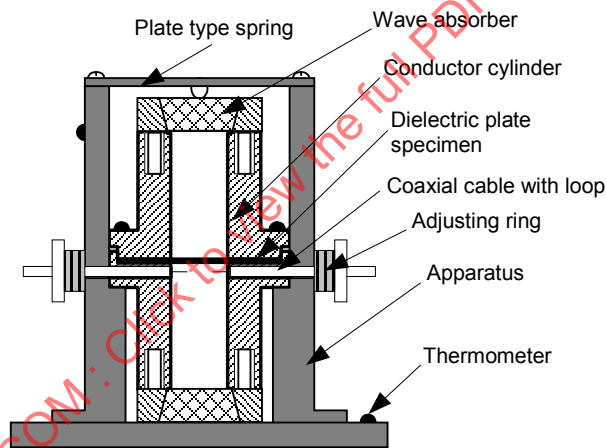
Set up the measurement equipment and apparatus as shown in Figures 1 and 2. All measurement equipments, apparatus and dielectric specimens shall be kept in a clean, dry state as high humidity degrades unloaded Q . The relative humidity is preferable to be less than 60 %.

b) Measurement of reference level

The reference level, level of full transmission power, is measured first. Connect the reference line between the S parameter modules and measure the full transmission power level over the entire measurement frequency range.

c) Measurements of dimensions and relative conductivity of conducting cylinder: d, h, σ_r

Set the empty cavity and adjust the insertion attenuation IA_0 to be around 30 dB by changing the distance between two semi-rigid cables.



IEC 2024/05

Figure 15 – Measurement apparatus for temperature coefficient of relative permittivity

Measure f_{01} and Q_{u1} of the TE_{011} resonance mode and measure f_{03} of the TE_{013} resonance modes. Rough values of f_{01} and f_{03} are estimated from the mode chart shown in Figure 16. Calculate unloaded Q by the following equation:

$$Q_u = \frac{f_0 / \Delta f}{1 - A_t} \quad (35)$$

$$A_t = 10^{-IA_0 / 20} \quad (36)$$

Calculate the dimensions d, h , and σ_r of conducting cylinder from equations (20) to (22).

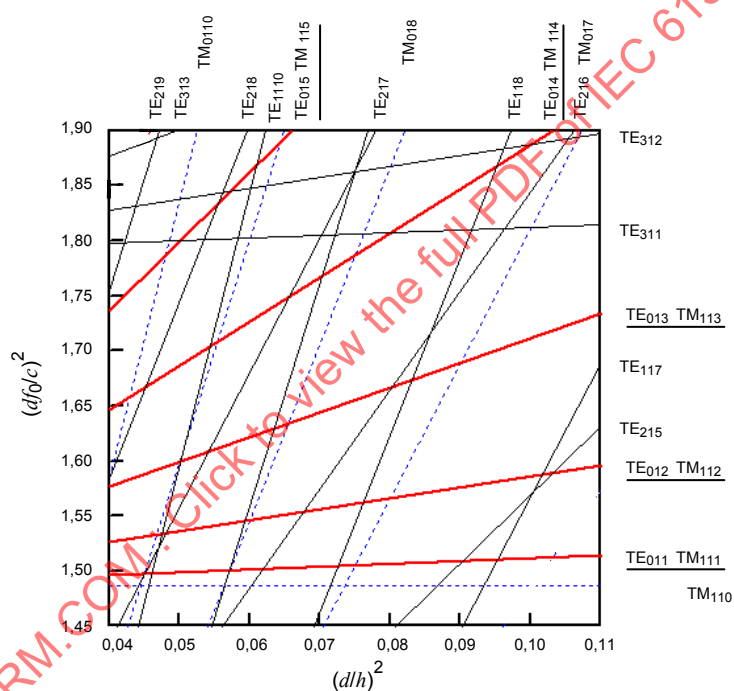
As the conductivity of the conducting cylinder degrades day by day due to wear or oxidation of the metal surface, this measurement of d , h , and σ_r shall be repeated every time prior to the measurement of the test specimens. It is preferable to polish the surface of the conducting cylinder when the conductivity degrades about 5 %.

d) Measurement of complex permittivity of test specimen: ε' , $\tan \delta$

Place the test specimen between two cylinders and clamp them by clips. Measure the resonance frequency and unloaded Q of the TE_{011} resonance mode. Calculate the ε' and $\tan \delta$ from equations (30) and (31).

e) Measurement of temperature coefficient of relative permittivity: $TC\varepsilon$

Set the measurement apparatus with dielectric specimen in oven (Figure 15). By changing the temperature in the oven, measure the resonance frequency of TE_{011} resonance mode. Calculate the ε' at each temperature and calculate $TC\varepsilon$ from equation (3).



IEC 2025/05

Figure 16 – Mode chart of TE_{011} and TE_{013} modes for an empty cavity

Annex A (informative)

Errors on ε_r caused by air gap between dielectric specimen and upper conducting plate

Figure A.1 shows the error of ε' caused by the air gap between dielectric specimen and upper conducting plates. The error $\Delta\varepsilon$ was calculated for the TE_{021} mode dielectric specimens with resonance frequency of 77 GHz. Three dielectric specimens have the following ε' and diameter: $\varepsilon' = 5$ and $d = 3,59$ mm, $\varepsilon' = 10$ and $d = 2,40$ mm, and $\varepsilon' = 20$ and $d = 1,59$ mm. The height h_c is fixed to be 1,80 mm in the calculation.

As shown in the figure, the error $\Delta\varepsilon/\varepsilon'$ is less than 0,01 % in the case of $\Delta h < 50$ μm . As a result, the height h_c can be used for an effective height h of the dielectric specimen in the calculation of ε' and $\tan \delta$.

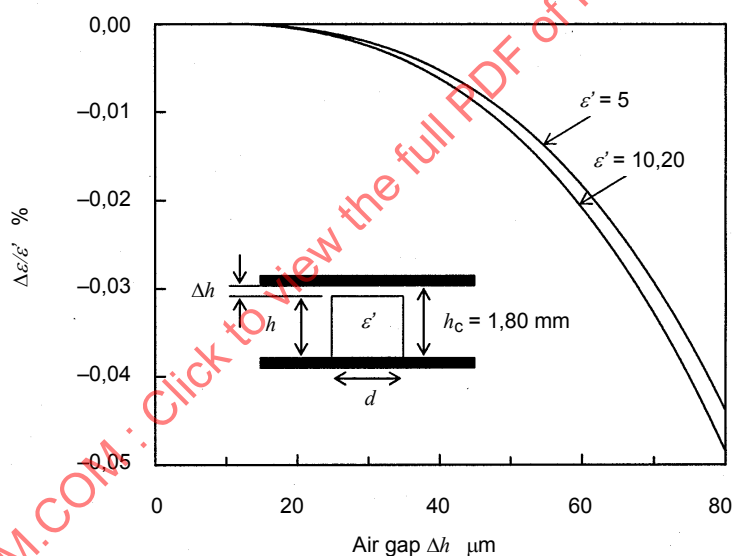


Figure A.1 – Error on ε' caused by air gap between dielectric specimen
and upper conducting plates

Annex B (informative)

Derivation of equation (15) for σ_r

By using equation (10), unloaded Q 's of the TE_{021} and $TE_{02\delta}$ mode reference resonators are given by the following equations:

$$\frac{1}{Q_{u1}} = P_{e1} \tan \delta_1 + \frac{R_{S1}}{G_1} \quad (A.1)$$

$$\frac{1}{Q_{u\delta}} = P_{e\delta} \tan \delta_\delta + \frac{R_{S\delta}}{G_\delta} \quad (A.2)$$

where P_{e1} and $P_{e\delta}$ are the partial electric energy filling factors, and G_1 and G_δ are the geometric factors for each reference resonators. The values P and G are given by following equations:

$$P_e = \frac{\varepsilon' \iiint_{V_d} |E|^2 dv}{\varepsilon' \iiint_{V_d} |E|^2 dv + \iiint_{V_{air}} |E|^2 dv} \quad (A.3)$$

$$G_1 = 2\pi f_0 \frac{\mu_0 \iiint_{V_t} |H|^2 dv}{\iint_s |H_t|^2 ds} \quad (A.4)$$

where $\iiint_{V_d} |E|^2 dv$ and $\iiint_{V_{air}} |E|^2 dv$ are the integration of the electric field inside and outside of the dielectric rod;

$\iiint_{V_t} |H|^2 dv$ is the integration of the magnetic field in the resonance space, and

$\iint_s |H_t|^2 ds$ the tangential magnetic field at the surface of the conducting plates.

The factors P_{e1} and G_1 in equation (A.1) are given by as follows by comparing equations (A.1) and (10):

$$P_{e1} = \frac{1}{A} \quad (A.5)$$

$$G_1 = \frac{A}{B} \quad (A.6)$$

The factors $P_{e\delta}$ and G_δ in equation (A.2) are calculated by the numerical analyses such as the Finite Element Method or the Mode Matching Method. The values are given in Table 4 for the reference sapphire resonators used in this document.

Although the reference resonators are designed to have the same resonance frequency, actual resonance frequencies f_{01} and $f_{0\delta}$ for the TE_{021} and $TE_{02\delta}$ mode resonators are slightly different. In this case, $\tan \delta_1$ and $\tan \delta_\delta$ for the TE_{021} and $TE_{02\delta}$ mode resonators satisfy the following relations.

$$\frac{f_{01}}{\tan \delta_1} = \frac{f_{0\delta}}{\tan \delta_\delta} \quad (A.7)$$

The surface resistance R_S at the frequencies f_{01} and $f_{0\delta}$ are given from equation (11):

$$R_{S1} = \sqrt{\frac{\pi f_{01} \mu}{\sigma_0 \sigma_r}} \text{ and } R_{S\delta} = \sqrt{\frac{\pi f_{0\delta} \mu}{\sigma_0 \sigma_r}} \quad (A.8)$$

Using the equations (A.1), (A.2), (A.7) and (A.8), σ_r of the conducting plates is given as follows:

$$\sigma_r = \sigma / \sigma_0 = \frac{\pi \mu f_{01} f_{0\delta}}{\sigma_0} \left[\frac{Q_{u1} Q_{u\delta}}{G_1 G_\delta} \cdot \frac{G_1 P_{e1} \sqrt{f_{01}} - G_\delta P_{e\delta} \sqrt{f_{0\delta}}}{Q_{u1} P_{e1} f_{01} - Q_{u\delta} P_{e\delta} f_{0\delta}} \right]^2 \quad (A.9)$$

Equation (15) is derived from equation (A.9) under the condition of $f_{01} = f_{0\delta}$.

In the same way, equation (16) is given from equations (A.1) and (A.2) under the condition of $f_{01} = f_{0\delta}$, $\tan \delta_1 = \tan \delta_\delta$, and $R_{S1} = R_{S\delta}$.

Bibliography

a) Dielectric rod resonator method excited by NRD-guide

- [1] YONEYAMA, T and NISHIDA, S *Nonradiative dielectric waveguide for millimeter-wave integrated circuits*, IEEE Trans. on MTT, MTT-29, pp.1188-1192, Nov. 1981.
- [2] NAKAYAMA, A., FUKUURA, A and NISHIMURA, M *Millimeter-wave measurement of complex permittivity using dielectric rod resonator excited by NRD-guide*, IEEE Trans. on MTT, MTT-51, pp.170-177, Jan. 2003.
- [3] HAKKI, BW. and COLEMAN, PD. *A Dielectric Resonator Method of Measuring Inductive Capacities in The Millimeter Range*, IRE Trans., Microwave Theory Tech., MTT-8, pp.402-410, 1960.
- [4] KOBAYASHI, Y. and KATOH, M. *Microwave Measurement of Dielectric Properties of Low-Loss Materials by the Dielectric Rod Resonator Method*, IEEE Trans. on MTT, MTT-33, pp.586-592, July 1985.

b) Cut-off waveguide method excited by coaxial cables with small loops

- [5] SHIMIZU, T. and KOBAYASHI, Y. *Cut-off circular waveguide method for dielectric substrate measurements in millimeter wave range*, IEICE Trans. Electron., pp. 672-680, 2004.
 - [6] SHIMIZU, T. NISHINO, T. and KOBAYASHI, Y. *Some discussions of the resonator structure for the cut-off waveguide method and the round robin test*, 33rd European Microwave Conf. Proc., pp.2-39, pp.755-758, Oct. 2003.
 - [7] SHIMIZU, T. MA, Z. and KOBAYASHI, Y. *Design of a grooved circular cavity for dielectric substrate measurements in millimeter wave region*, IEICE Trans. Electron., Vol. E86-C, No. 8, pp.1715-1720, Aug. 2003.
 - [8] SHIMIZU, T. and KOBAYASHI, Y. *Millimeter wave measurements of some low-loss dielectric plates by a novel cut-off circular waveguide method*, 32nd European Microwave Conf. Proc., pp. 825-828, Sep. 2002.
 - [9] SHIMIZU, T. and KOBAYASHI, Y. *Millimeter wave measurements of temperature dependence of complex permittivity of GaAs plates by a circular waveguide method*, 2001 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest, THIF-51, pp.2195-2198, Jun. 2001.
 - [10] KOBAYASHI, Y. SATO, J. *Complex permittivity measurement of dielectric plates by a cavity resonance method*, Papers of Technical Group on Microwaves, Inst. Elect. Inf. Commun. Engns. Jap., EMCJ88-58, MW88-40, pp.43-50, Nov. 1988.
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	36
1 Domaine d'application et objet	38
2 Références normatives	38
3 Paramètre de mesure	39
4 Méthode du résonateur diélectrique en barreau excité par un guide NRD	40
4.1 Equipement et appareil de mesure	40
4.2 Théorie et équations de calcul	43
4.3 Procédure de mesure	48
4.4 Exemple de résultat de mesure	51
5 Méthode de guide d'ondes de coupure excité par des câbles coaxiaux présentant de petites boucles	54
5.1 Equipement et appareil de mesure	54
5.2 Théorie et équations de calcul	56
5.3 Procédure de mesure	61
Annexe A (informative) Erreurs de ε_r provoquées par un entrefer entre le spécimen diélectrique et la lame conductrice supérieure	63
Annexe B (informative) Dérivation de l'équation (15) pour σ_r	64
Bibliographie	66
Figure 1 – Diagramme synoptique de l'équipement de mesure	40
Figure 2 – Appareil de mesure faisant appel à la méthode du résonateur diélectrique en barreau excité par un guide NRD	42
Figure 3 – Transducteurs de guides d'ondes, du guide NRD au guide d'ondes	43
Figure 4 – Configuration d'un résonateur diélectrique en barreau cylindrique court-circuité aux deux extrémités par deux lames conductrices parallèles	44
Figure 5 – Calculs de u^2 et W en fonction de v^2 pour les modes de résonance TE_{011} , TE_{021} et TE_{031}	45
Figure 6 – Configuration du résonateur diélectrique de référence pour la mesure de la valeur σ_r des lames conductrices	47
Figure 7 – Diamètre d des résonateurs en mode TE_{011} , TE_{021} et TE_{031} avec une fréquence de résonance de 60 GHz	51
Figure 8 – Diamètre d des résonateurs en mode TE_{011} , TE_{021} et TE_{031} avec une fréquence de résonance de 77 GHz	51
Figure 9 – Exemple de crête de résonance en mode TE_{021}	52
Figure 10 – Résultat de mesure de dépendance en température des valeurs f_0 et ε' du saphir	54
Figure 11 – Appareil de mesure pour la méthode de guide d'ondes de coupure	55
Figure 12 – Réponse en fréquence de la cavité vide avec des dimensions de $d = 7$ mm et $h = 31$ mm	57
Figure 13 – Terme correctif $\Delta\varepsilon/\varepsilon_a$	59
Figure 14 – Termes correctifs $\Delta A/A$ et $\Delta B/B$	60

Figure 15 – Appareil de mesure du coefficient de température de la permittivité relative	61
Figure 16 – Graphique de mode des modes TE_{011} et TE_{013} pour une cavité vide	62
Figure A.1 – Erreur de ε' provoquée par un entrefer entre le spécimen diélectrique et les lames conductrices supérieures	63
Tableau 1 – Diamètre des lames conductrices	42
Tableau 2 – Dimensions des bandes diélectriques de guide NRD	43
Tableau 3 – Dimensions des transducteurs de guides d'ondes	43
Tableau 4 – Dimensions des résonateurs saphirs de référence ainsi que leur facteur de remplissage d'énergie électrique partiel P_e et leur facteur géométrique G	47
Tableau 5 – Diamètre d des spécimens à essayer pour une mesure à 60 GHz et 77 GHz. La hauteur h est fixée à 2,25 mm et 1,80 mm pour une mesure à 60 GHz et 77 GHz, respectivement	49
Tableau 6 – Résultats de mesure de la valeur σ_r des lames conductrices	52
Tableau 7 – Résultats de mesure des valeurs ε' et $\tan \delta$ de spécimens en saphir et PTFE	53
Tableau 8 – Dimensions recommandées pour le cylindre conducteur	56

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61338-1-4:2005

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

RÉSONATEURS DIÉLECTRIQUES À MODES GUIDÉS –

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

AVANT-PROPOS

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

La Norme internationale CEI 61338-1-4 a été établie par le comité d'études 49 de la CEI: Dispositifs piézoélectriques et diélectriques pour la commande et le choix de la fréquence.

La présente version bilingue (2014-02) correspond à la version anglaise monolingue publiée en 2005-11.

Le texte anglais de cette norme est issu des documents 49/748/FDIS et 49/751/RVD.

Le rapport de vote 49/751/RVD donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

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

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

La CEI 61338 comprend les parties suivantes, 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 les 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

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

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

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

RÉSONATEURS DIÉLECTRIQUES À MODES GUIDÉS –

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

1 Domaine d'application et objet

La présente partie de la CEI 61338 décrit la méthode de mesure des propriétés diélectriques des matériaux des résonateurs diélectriques fonctionnant à des fréquences millimétriques.

La présente norme aborde deux méthodes de mesure: a) la méthode du résonateur diélectrique en barreau excité par un guide NRD (guide d'ondes diélectrique non radiatif) et b) la méthode de guide d'ondes de coupure excité par des câbles coaxiaux présentant de petites boucles.

a) La méthode du résonateur diélectrique en barreau excité par un guide NRD est similaire à la méthode du résonateur diélectrique en barreau indiquée dans la CEI 61338-1-3. Les caractéristiques de cette méthode sont les suivantes:

- une solution mathématique complète et exacte de la permittivité complexe est donnée par le programme d'une machine à calculer;
- l'erreur de mesure est inférieure à 0,3 % pour ε' et inférieure à $0,05 \times 10^{-4}$ pour $\tan \delta$;
- les gammes de mesures applicables de la permittivité complexe pour cette méthode sont les suivantes:

fréquence: $30 \text{ GHz} < f < 100 \text{ GHz}$;

permittivité relative: $2 < \varepsilon' < 30$;

facteur de perte: $10^{-6} < \tan \delta < 10^{-2}$.

b) La méthode de guide d'ondes de coupure excité par des câbles coaxiaux présentant de petites boucles utilise un échantillon de lame diélectrique placé dans un cylindre circulaire du mode TE_{011} . Les caractéristiques de cette méthode sont les suivantes:

- l'effet pelliculaire est corrigé à l'aide des tableaux de correction, à partir d'une analyse rigoureuse;
- l'erreur de mesure est inférieure à 0,5 % pour ε' et inférieure à $0,05 \times 10^{-4}$ pour $\tan \delta$;
- la valeur de TCF est mesurée avec un niveau d'exactitude élevé;
- les gammes de mesures applicables des propriétés diélectriques pour cette méthode sont les suivantes:

fréquence: $30 \text{ GHz} < f < 100 \text{ GHz}$;

permittivité relative: $2 < \varepsilon' < 30$;

facteur de perte: $10^{-6} < \tan \delta < 10^{-2}$.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

CEI 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 les résonateurs diélectriques fonctionnant aux hyperfréquences*

3 Paramètre de mesure

Les paramètres de mesure sont définis comme suit:

$$\dot{\varepsilon}_r = \varepsilon' - j\varepsilon'' = D / (\varepsilon_0 E) \quad (1)$$

$$\tan \delta = \varepsilon'' / \varepsilon' \quad (2)$$

$$TC\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_{\text{ref}}} \frac{\varepsilon_T - \varepsilon_{\text{ref}}}{T - T_{\text{ref}}} \times 10^6 \quad (1 \times 10^{-6}/\text{K}) \quad (3)$$

$$TCF = \frac{1}{f_{\text{ref}}} \frac{f_T - f_{\text{ref}}}{T - T_{\text{ref}}} \times 10^6 \quad (1 \times 10^{-6}/\text{K}) \quad (4)$$

où

- D est la densité du flux électrique;
- E est l'intensité du champ électrique;
- ε_0 est la permittivité dans le vide;
- $\dot{\varepsilon}_r$ est la permittivité relative complexe;
- ε' et ε'' sont les composantes réelle et imaginaire de la permittivité relative complexe $\dot{\varepsilon}_r$;
- $TC\varepsilon$ est le coefficient de température de la permittivité relative et TCF le coefficient de température de la fréquence de résonance;
- ε_T et ε_{ref} sont les parties réelles de la permittivité complexe relative à la température T et à la température de référence T_{ref} ($T_{\text{ref}} = 20^\circ\text{C}$ à 25°C), respectivement;
- f_T et f_{ref} sont les fréquences de résonance aux températures T et T_{ref} , respectivement.

La valeur TCF est associée à $TC\varepsilon$ au moyen de l'équation suivante:

$$TCF = -\frac{1}{2}TC\varepsilon - \alpha \quad (5)$$

où α est le coefficient de dilatation thermique du spécimen diélectrique.

Il convient de noter que cette équation est résolue lorsque 100 % de l'énergie électromagnétique, en mode de mesure de résonance, sont concentrés à l'intérieur du spécimen diélectrique. Dans le cas présent, la valeur TCF dévie de plusieurs fois $10^{-6}/\text{K}$ par rapport à la valeur calculée, car un pourcentage de l'énergie électromagnétique est stocké en dehors du spécimen diélectrique.

4 Méthode du résonateur diélectrique en barreau excité par un guide NRD

4.1 Equipement et appareil de mesure

L'équipement et l'appareil de mesure sont les suivants:

a) Equipement de mesure

La Figure 1 représente un diagramme synoptique de l'équipement nécessaire pour la mesure d'ondes millimétriques. Pour la mesure des propriétés diélectriques, seule l'information sur l'amplitude de la puissance transmise est exigée, c'est-à-dire que l'information concernant la phase de la puissance transmise n'est pas requise. Un analyseur de réseaux avec échelle peut être utilisé pour procéder aux mesures, mais un analyseur de réseaux vectoriels offre des mesures de données plus précises.

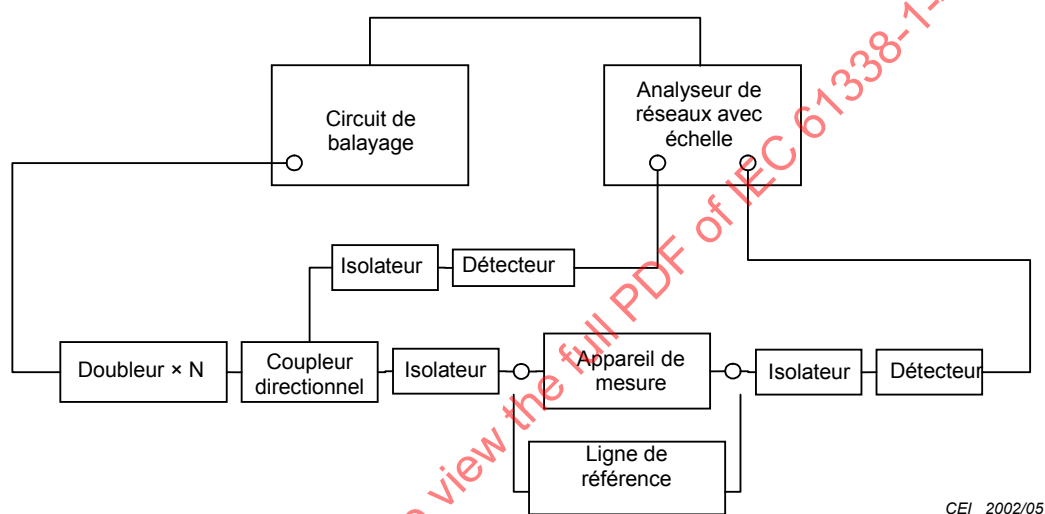


Figure 1a – Analyseur de réseaux avec échelle

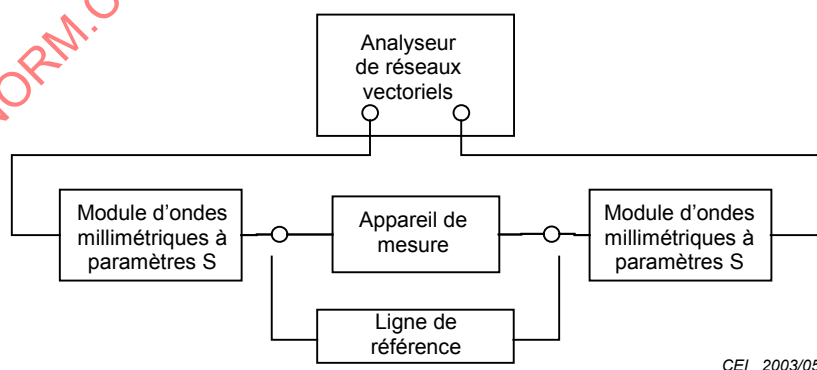


Figure 1b – Analyseur de réseaux vectoriels

Figure 1 – Diagramme synoptique de l'équipement de mesure

b) Appareil de mesure

La Figure 2a illustre une configuration d'appareil de mesure faisant appel à la méthode du résonateur diélectrique en barreau excité par un guide NRD. La Figure 2b représente une section de l'appareil de mesure des valeurs ε' et $\tan \delta$ d'un spécimen diélectrique d'une hauteur de h et d . Le spécimen diélectrique est placé au centre de l'appareil, entre deux lames conductrices parallèles et couplé à des guides NRD d'entrée et de sortie. Un petit entrefer Δh est maintenu entre le spécimen diélectrique et la lame conductrice supérieure. Pour $\Delta h < 50 \mu\text{m}$, l'entrefer peut ne pas être pris en considération pour le calcul de ε' (voir l'Annexe A).

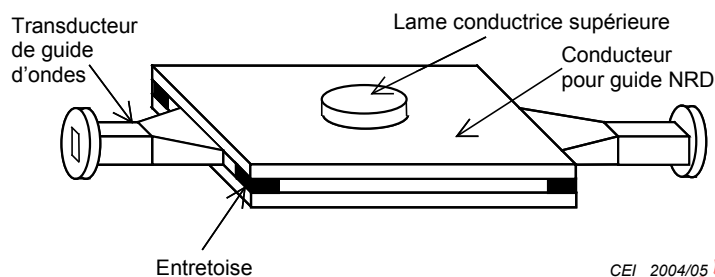
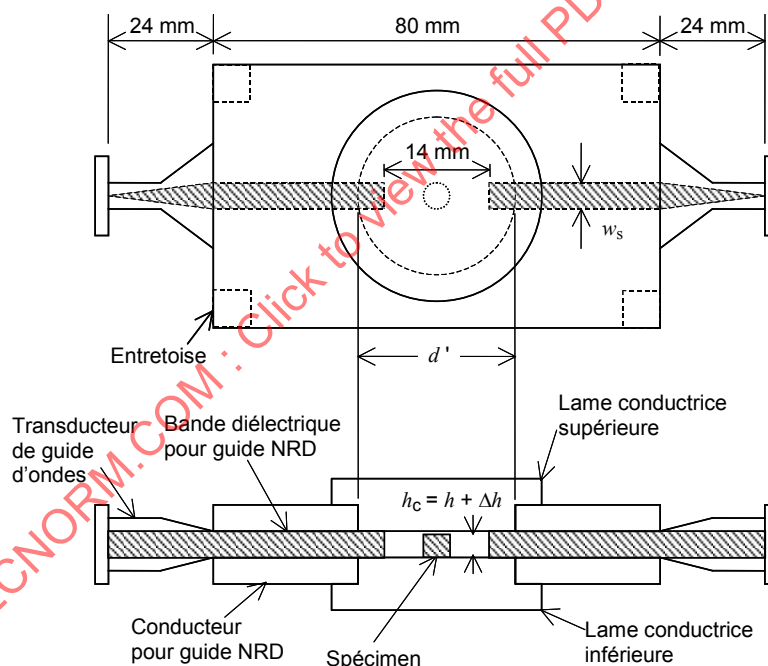


Figure 2a – Configuration d'appareil

Dimensions en millimètres

Figure 2b – Appareil de mesure de ε' et $\tan \delta$

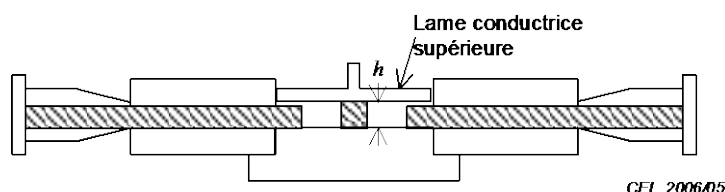


Figure 2c – Appareil de mesure de TCF et $TC\epsilon$

Figure 2 – Appareil de mesure faisant appel à la méthode du résonateur diélectrique en barreau excité par un guide NRD

La Figure 2c représente un appareil de mesure du coefficient de température de la fréquence de résonance TCF ou de la permittivité relative $TC\epsilon$. Pour cette mesure, il convient de mettre en contact la lame conductrice supérieure et le spécimen diélectrique. La hauteur h_s de la bande diélectrique du guide NRD est conçue pour être inférieure à la hauteur h du spécimen diélectrique. La lame conductrice supérieure est installée en douceur afin qu'elle entre en contact avec la face supérieure du spécimen, de sorte qu'aucune pression excessive ne détériore la surface de la lame conductrice.

Tel qu'indiqué dans le Tableau 1, le diamètre des lames conductrices de la Figure 2b est déterminé au moyen du diamètre du spécimen diélectrique. Dans le cadre de cette méthode de mesure, les valeurs ϵ' et $\tan \delta$ sont calculées dans des conditions telles que les lames conductrices disposent d'un diamètre de grandeur infinie. Etant donné que les lames conductrices réelles disposent d'un diamètre de grandeur infinie, une partie de l'énergie électromagnétique fuit vers l'extérieur des lames conductrices. Même si cette fuite d'énergie modifie les fréquences de résonance et diminue le facteur de qualité à vide Q , sa contribution est négligeable si $d'/d > 5$.

Le Tableau 2 fournit un exemple de dimensions de bandes diélectriques du guide NRD de la Figure 2b. Les bandes diélectriques du guide NRD sont composées de polytétrafluoréthylène (PTFE) ou de copolymère de styrène réticulé.

La Figure 3 représente un transducteur de guide d'ondes qui relie l'appareil de mesure à l'équipement de mesure à l'aide de guides d'ondes WR-15 ou WR-10. Le Tableau 3 contient les dimensions des transducteurs de guides d'ondes. Tel qu'indiqué sur la Figure 2b, l'extrémité de la bande diélectrique du guide NRD est insérée dans le transducteur.

Tableau 1 – Diamètre des lames conductrices

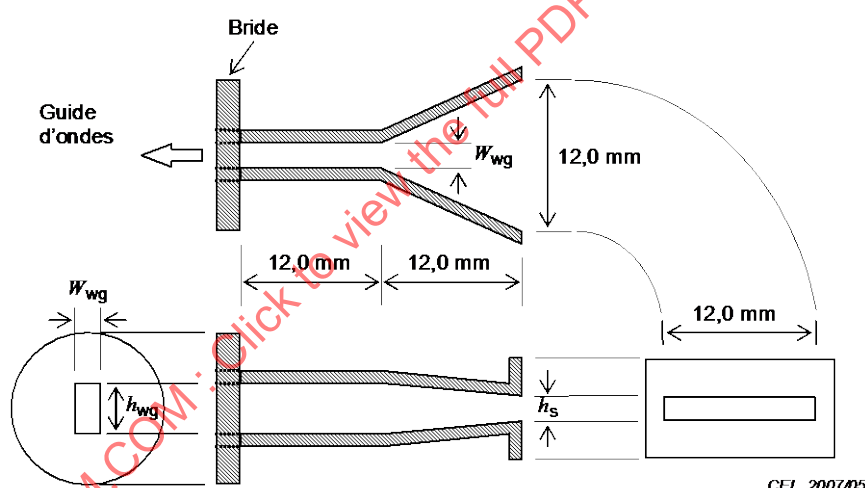
Diamètre d'	$d' = 5 d \sim 10 d$ d : diamètre du spécimen diélectrique
Matériau de la lame conductrice	Cuivre ou argent recommandé

Tableau 2 – Dimensions des bandes diélectriques de guide NRD

Matériau	Gamme des fréquences de mesure GHz	Hauteur h_s mm	Largeur w_s mm
PTFE ($\varepsilon' = 2,0$)	55 à 65	2,25	2,50
	75 à 80	1,80	1,90
Styrène réticulé Copolymère ($\varepsilon' = 2,5$)	55 à 65	2,25	2,00
	75 à 80	1,80	1,60

Tableau 3 – Dimensions des transducteurs de guides d'ondes

Guide d'ondes	Gamme de fréquences GHz	h_{wg} mm	w_{wg} mm	h_s mm
WR-15	55 à 65	3,80	1,90	2,25
WR-10	75 à 80	2,54	1,27	1,80



CEI 2007/05

Figure 3 – Transducteurs de guides d'ondes, du guide NRD au guide d'ondes

4.2 Théorie et équations de calcul

4.2.1 Mesure de la permittivité relative et du facteur de perte

La Figure 4 illustre une configuration du résonateur en mode TE_{0m1} . Le spécimen diélectrique cylindrique est court-circuité aux deux extrémités par les deux lames conductrices parallèles. Les valeurs ε' et $\tan \delta$ du résonateur diélectrique sont calculées à partir de la fréquence de résonance f_0 et du facteur de qualité à vide Q_u mesurés pour le mode de résonance TE_{0m1} . Il est recommandé d'utiliser les modes de résonance TE_{011} , TE_{021} et TE_{031} pour les matériaux avec $\varepsilon' = 2$ à 4, 4 à 20 et 20 à 30, respectivement.

La longueur d'onde en résonance λ_0 dans le vide et la longueur d'onde guidante λ_g dans la ligne en transmission diélectrique sont obtenues au moyen des équations suivantes:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0}, \quad \lambda_g = 2h \quad (6)$$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide ($c = 2,9\,979 \times 10^8$ m/s).

Tel que décrit en 4.1b), l'entrefer Δh peut être négligé pour le calcul des valeurs ε' et $\tan \delta$ si $\Delta h < 50 \mu\text{m}$. Par conséquent, la hauteur h est utilisée dans l'équation (6).

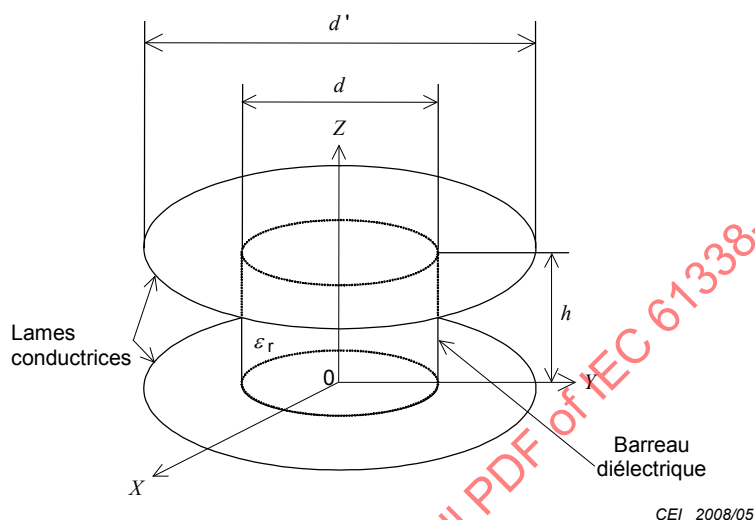


Figure 4 – Configuration d'un résonateur diélectrique en barreau cylindrique court-circuité aux deux extrémités par deux lames conductrices parallèles

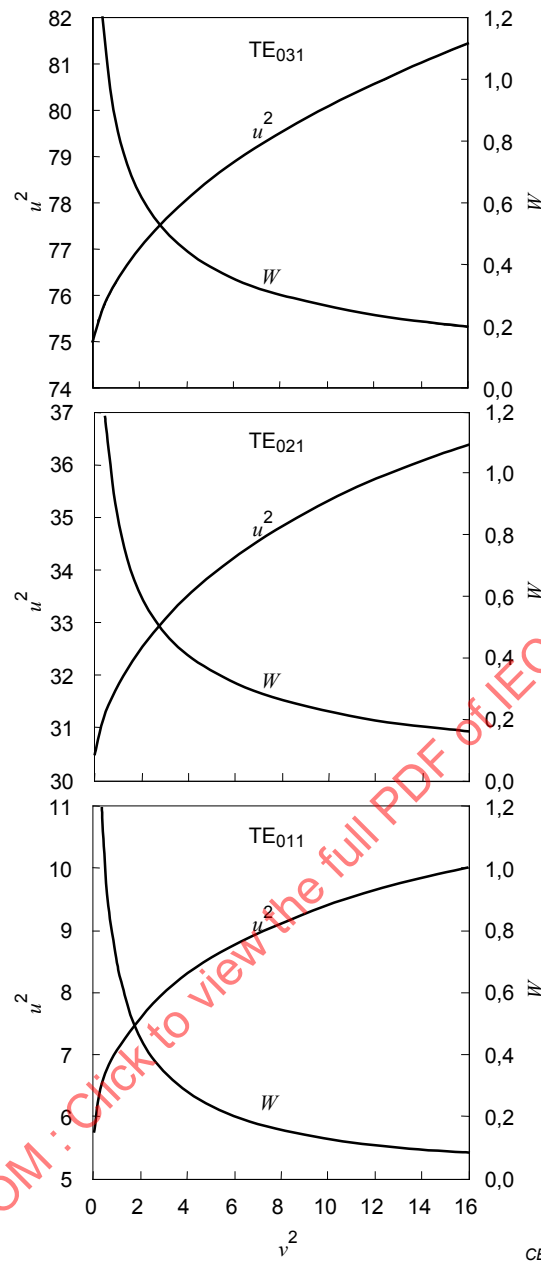
La valeur v^2 est calculée à partir de λ_0 et λ_g :

$$v^2 = \left(\frac{\pi d}{\lambda_0} \right)^2 \left[\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_g} \right)^2 - 1 \right] \quad (7)$$

La valeur u^2 est calculée à l'aide de la valeur v^2 :

$$u \frac{J_0(u)}{J_1(u)} = -v \frac{K_0(v)}{K_1(v)} \quad (8)$$

où $J_n(u)$ est la fonction de Bessel de la première sorte et $K_n(v)$ est la fonction de Bessel modifiée de la deuxième sorte. Pour toute valeur de v , la solution m-th u existe entre u_{0m} et u_{1m} , où $J_0(u_{0m}) = 0$ et $J_1(u_{1m}) = 0$. Les première, deuxième et troisième solutions de $m = 1, 2$ et 3 sont indiquées sur la Figure 5.



CEI 2009/05

Figure 5 – Calculs de u^2 et W en fonction de v^2 pour les modes de résonance TE₀₁₁, TE₀₂₁ et TE₀₃₁

La permittivité relative ε' est calculée au moyen de l'équation suivante à l'aide des valeurs v^2 et u^2 :

$$\varepsilon' = \left(\frac{\lambda_0}{\pi d} \right)^2 (u^2 + v^2) + 1 \quad (9)$$

Le facteur de qualité à vide Q mesuré, Q_u , permet de calculer le facteur de perte $\tan \delta$:

$$\tan \delta = \frac{A}{Q_u} - BR_S = \frac{A}{Q_u} - \frac{B'}{\sqrt{\sigma_r}} \quad (10)$$

où

$$R_S(\Omega) = \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu}{\sigma}} = \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu}{\sigma_0 \sigma_r}} \quad (11)$$

$$A = 1 + \frac{W}{\varepsilon'} \quad (12)$$

$$B = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_g} \right)^3 \frac{1+W}{30\pi^2 \varepsilon'}, \quad B' = B \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu}{\sigma_0}} \quad (13)$$

$$W = \frac{J_1^2(u)}{K_1^2(v)} \cdot \frac{K_0(v)K_2(v) - K_1^2(v)}{J_1^2(u) - J_0(u)J_2(u)} \quad (14)$$

Ici, R_S est la résistance de la surface des lames conductrices et σ est la conductivité des lames conductrices. La conductivité relative σ_r est définie comme $\sigma = \sigma_0 \sigma_r$, où σ_0 est la conductivité du cuivre cuit selon la Norme internationale ($\sigma_0 = 5,8 \times 10^7$ S/m à 20 °C). μ est la perméabilité des lames conductrices dont la valeur est de $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m pour des conducteurs non magnétiques tels que le cuivre ou l'argent.

La valeur $\tan \delta$ est calculée à l'aide de R_S et B ou σ_r et B' . Etant donné que la valeur σ_r est indépendante de la fréquence et constitue un bon indicateur du niveau de dégradation de la conductivité provoquée par la rugosité de la surface ou l'oxydation des lames conductrices, la valeur σ_r est utilisée dans un souci de praticité.

La fonction W/ε' est égale au rapport de l'énergie du champ électrique stockée à l'extérieur du spécimen diélectrique sur l'énergie du champ électrique stockée à l'intérieur du spécimen diélectrique. La valeur W est égale à zéro si 100 % de l'énergie du champ électrique sont concentrés à l'intérieur du spécimen. Les résultats calculés de W par rapport à v pour les modes de résonance TE_{011} , TE_{021} et TE_{031} sont indiqués sur la Figure 5.

4.2.2 Conductivité relative des lames conductrices

La valeur de σ_r ou R_S des lames conductrices est déterminée avant le calcul de la valeur $\tan \delta$ des spécimens diélectriques. La précision de la mesure de σ_r est primordiale pour la précision de la valeur $\tan \delta$, car A/Q_u et $B'/\sqrt{\sigma_r}$ dans l'équation (10) présentent le même ordre de grandeur pour $\tan \delta$ de l'ordre de 10^{-4} .

La Figure 6 illustre une configuration de l'appareil de mesure de la valeur σ_r des lames conductrices. Deux saphirs à cristal unique sont utilisés avec les modes de résonance TE_{021} et TE_{028} pour mesurer la valeur σ_r . Les saphirs utilisés comme résonateurs de référence présentent une valeur $\tan \delta$ faible à des fréquences millimétriques et les mêmes valeurs ε' et $\tan \delta$. L'axe de chaque barreau est parallèle à l'axe C. Les dimensions pour les modes de résonance TE_{021} et TE_{028} sont conçues de façon à obtenir une fréquence de résonance identique. Le Tableau 4 indique les dimensions des saphirs pour les fréquences de résonance de 60 GHz et 77 GHz.

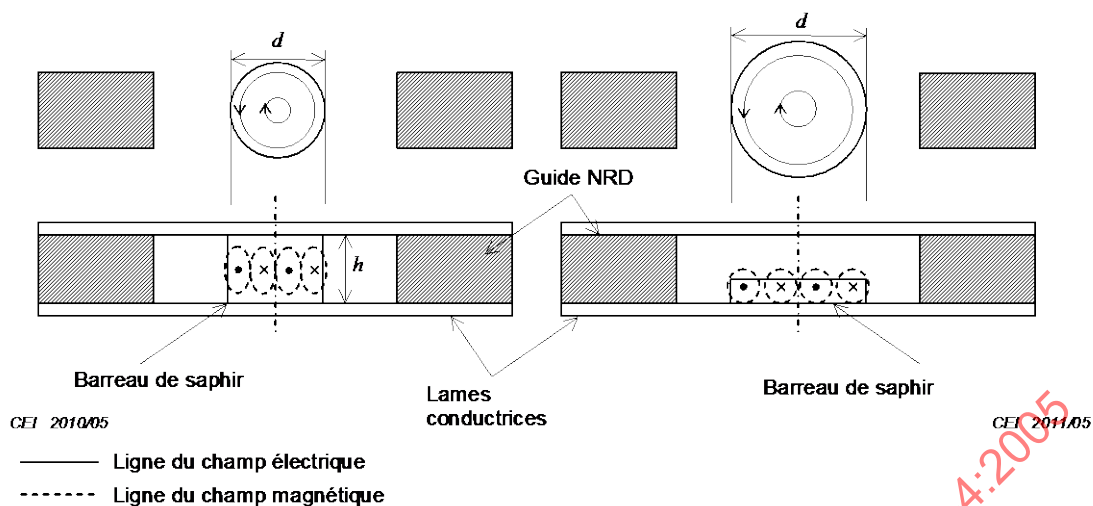
Figure 6a – Résonateur en mode TE₀₂₁Figure 6b – Résonateur en mode TE_{02δ}

Figure 6 – Configuration du résonateur diélectrique de référence pour la mesure de la valeur σ_r des lames conductrices

Tableau 4 – Dimensions des résonateurs saphirs de référence ainsi que leur facteur de remplissage d'énergie électrique partiel P_e et leur facteur géométrique G

f_0 GHz	TE ₀₂₁				TE _{02δ}			
	d mm	h mm	P_{e1}	G_1 Ω	d mm	h mm	$P_{eδ}$	$Gδ$ Ω
60	3,14	2,25	0,915	1 182	4,49	0,80	0,906	409
77	2,42	1,80	0,901	1 208	3,60	0,60	0,894	382

NOTE 1 Les spécifications du barreau de saphir sont comme suit:

$\mathcal{E}' = 9,4$, planéité: < 0,005 mm, rugosité des deux extrémités: $R_a < 0,01 \mu\text{m}$, rugosité du côté du barreau:

$R_a < 1 \mu\text{m}$,

perpendiculaire: < 0,1°, axe: parallèle à l'axe c < 0,3°.

NOTE 2 Les valeurs $P_{eδ}$ et $G_δ$ sont effectives pour le barreau de saphir normalisé avec une tolérance de $9,4 \pm 0,1$ pour la valeur $\mathcal{E}'$ et une tolérance dimensionnelle de $\pm 0,1$ mm pour d et h , respectivement.

Tel qu'indiqué sur la Figure 6, le résonateur en mode TE_{02δ} possède un rapport d/h supérieur. Le champ électromagnétique de ce mode est plus concentré à proximité de la surface du conducteur inférieur par rapport au résonateur en mode TE₀₂₁. Les différentes influences des pertes des conducteurs sur le facteur de qualité à vide Q_u pour chaque résonateur permettent le calcul de σ_r . Un niveau de précision élevé est obtenu pour σ_r en augmentant la différence entre les valeurs Q_u des résonateurs en modes TE₀₂₁ et TE_{02δ}.

La fréquence de résonance et le facteur de qualité à vide Q des résonateurs en modes TE₀₂₁ et TE_{02δ} sont notés à l'aide des indices 1 et δ : f_{01} et Q_{u1} pour le résonateur TE₀₂₁, $f_{0δ}$ et $Q_{uδ}$ pour le résonateur TE_{02δ}. Les résonateurs TE₀₂₁ et TE_{02δ} de référence présentent la même fréquence de résonance $f_{01} = f_{0δ}$ et un facteur de qualité à vide Q différent

($Q_{u1} > Q_{u\delta}$). La valeur σ_r pour la fréquence de résonance $f_{01} = f_{0\delta}$ est obtenue au moyen de l'équation suivante:

$$\sigma_r = \sigma / \sigma_0 = \frac{\pi \mu f_0}{\sigma_0} \left[\frac{Q_{u1} Q_{u\delta}}{G_1 G_\delta} \cdot \frac{G_1 P_{e1} - G_\delta P_{e\delta}}{Q_{u1} P_{e1} - Q_{u\delta} P_{e\delta}} \right]^2 \quad (15)$$

où P_{e1} et $P_{e\delta}$ sont les facteurs de remplissage d'énergie électrique partiel des résonateurs TE_{021} et $TE_{02\delta}$ de référence, respectivement. G_1 et G_δ étant les facteurs géométriques pour chacun des résonateurs de référence. Les valeurs calculées de P_e et G pour les résonateurs saphirs de référence avec $\varepsilon' = 9,4$ sont indiquées dans le Tableau 4. Ces valeurs s'appliquent lorsque les dimensions réelles sont conformes aux dimensions de conception avec un écart de $\pm 0,01$ mm. La dérivation de l'équation (15) et les formules pour P et G sont indiquées dans l'Annexe B.

NOTE 3 Le facteur de perte des résonateurs de référence est calculé à l'aide de l'équation suivante, si nécessaire.

$$\tan \delta_1 = \tan \delta_\delta = \frac{1}{Q_{u1} Q_{u\delta}} \cdot \frac{G_1 Q_{u\delta} - G_\delta Q_{u1}}{G_1 P_{e1} - G_\delta P_{e\delta}} \quad (16)$$

4.2.3 Coefficient de température de la fréquence de résonance et de la permittivité relative

Le coefficient de température de la fréquence de résonance TCF est obtenu en mesurant la fréquence de résonance à la température T et à la température de référence T_{ref} à l'aide de l'équation (4). De la même façon, le coefficient de température de la permittivité relative $TC\varepsilon$ est obtenu en calculant la permittivité relative à la température T et à la température de référence T_{ref} à l'aide de l'équation (3).

En général, la permittivité relative d'un matériau diélectrique a une influence non linéaire sur la température. Une procédure visant à gérer cette dépendance non linéaire en température de la fréquence de résonance ou de la permittivité relative est décrite dans la CEI 61338-1-3.

4.2.4 Dépendance en température du facteur de perte

La dépendance en température de $\tan \delta$ est obtenue en mesurant la valeur $\tan \delta$ à diverses températures. Pour le calcul de $\tan \delta$ à chaque température, la dépendance en température de σ_r est nécessaire. La dépendance en température de la conductivité du cuivre cuit conformément à la Norme internationale est donnée comme suit.

$$\sigma_0(T) = \frac{5,8 \times 10^7}{1 + 3,93 \times 10^{-3}(T - 20)} \quad (\text{S/m}) \quad (17)$$

Pour mesurer la valeur σ_r à la température de référence T_{ref} , l'équation suivante peut être utilisée, comme approximation de premier ordre de σ_r à une température de T .

$$\sigma_r(T) = \frac{\sigma_r}{1 + 3,93 \times 10^{-3}(T - T_{ref})} \quad (\%) \quad (18)$$

4.3 Procédure de mesure

La préparation des spécimens diélectriques et la procédure de mesure sont comme suit:

a) Préparation du résonateur saphir de référence

Préparer les résonateurs saphirs de référence avec les dimensions indiquées dans le Tableau 4. Afin de limiter l'erreur de mesure de la valeur σ_r des lames conductrices, leurs axes c doivent être parallèles à la direction z et les deux extrémités du barreau doivent être polies parallèlement l'une à l'autre et perpendiculairement à l'axe c .

b) Préparation des spécimens à essayer

Les résonateurs diélectriques en mode TE_{011} présentent de très petites dimensions pour la mesure à des fréquences millimétriques. Il est préférable d'utiliser les modes de résonance TE_{021} ou TE_{031} , en particulier pour la mesure des matériaux à valeur ε' élevée. Le Tableau 5 indique les diamètres recommandés pour les matériaux avec la valeur ε' comprise entre 2 et 40. La hauteur h est fixée à 2,25 mm et 1,80 mm pour la mesure à 60 GHz et 77 GHz, respectivement. Les Figures 7 et 8 indiquent le diamètre d des résonateurs en modes TE_{011} , TE_{021} et TE_{031} avec des fréquences de résonance de 60 GHz et 77 GHz, respectivement.

Tableau 5 – Diamètre d des spécimens à essayer pour une mesure à 60 GHz et 77 GHz.
La hauteur h est fixée à 2,25 mm et 1,80 mm pour une mesure à 60 GHz et 77 GHz,
respectivement

ε'	d (mm) $f_0 = 60$ GHz			d (mm) $f_0 = 77$ GHz		
	TE_{011}	TE_{021}	TE_{031}	TE_{011}	TE_{021}	TE_{031}
2,0	5,05	-		3,68		
2,5	3,80	-		2,83		
3,0	3,16	-		2,38		
3,5	2,75	-		2,08		
4,0	2,47	5,49		1,88	4,20	
5,0	-	4,67			3,59	
6,0	-	4,14			3,19	
8,0	-	3,45			2,67	
10,0		3,02			2,34	
12,0		2,72			2,11	
14,0		2,50			1,93	
16,0		2,32			1,80	
18,0		2,17			1,69	
20,0		2,05	3,21		1,59	2,49
25,0			2,85			2,21
30,0			2,58			2,01
35,0			2,38			1,85
40,0			2,22			1,73

c) Préparation de l'appareil de mesure

Installer l'équipement et l'appareil de mesure tel qu'indiqué sur les Figures 1 et 2. Tous les équipements, l'appareil de mesure et tous les spécimens diélectriques doivent être maintenus dans des conditions nettes et sèches, étant donné qu'une humidité élevée dégrade le facteur de qualité à vide Q . De préférence, l'humidité relative doit être inférieure à 60 %.

d) Mesure du niveau de référence

Mesurer le niveau de puissance totale de transmission (niveau de référence). Connecter les guides NRD d'entrée et de sortie à une bande diélectrique, d'une longueur de 14 mm, dont la hauteur h_s et la largeur W_s sont indiquées dans le Tableau 2. Mesurer le niveau de puissance totale de transmission sur la gamme des fréquences de mesure.

e) Mesure de la conductivité des lames conductrices

Connecter l'appareil de mesure tel qu'indiqué sur la Figure 6. Insérer le résonateur saphir TE_{021} au centre des lames conductrices et ajuster la distance entre le résonateur et la bande du guide NRD.

La Figure 9 illustre un exemple de la crête de résonance du mode TE_{021} . L'identification de cette crête est relativement simple, étant donné que les modes TM ou de résonance hybrides sont supprimés du résonateur excité par le guide NRD. Cette crête est identifiée car elle se déplace en fréquence vers le bas, lorsque la lame du haut se sépare lentement de la face supérieure du résonateur.

Ajuster l'affaiblissement d'insertion IA_0 (dB) de la crête de résonance sur une valeur comprise entre 15 dB et 30 dB par rapport au niveau de référence en modifiant la distance entre les résonateurs saphirs et la bande du guide NRD. Mesurer la valeur f_{01} et la largeur de bande à mi-puissance Δf du résonateur en mode TE_{021} . Calculer le facteur de qualité à vide Q , Q_{u1} , à l'aide de l'équation suivante.

$$Q_u = \frac{f_0 / \Delta f}{1 - 10^{-IA_0/20}} \quad (19)$$

De la même façon, insérer le résonateur saphir en mode $TE_{02\delta}$ dans l'appareil et mesurer les valeurs $f_{0\delta}$ et $Q_{u\delta}$.

Pour améliorer la précision de mesure de la valeur σ_r , répéter cette mesure plusieurs fois pour les résonateurs en mode TE_{021} et $TE_{02\delta}$. A l'aide des valeurs moyennes de f_{01} , Q_{u1} , $f_{0\delta}$ et $Q_{u\delta}$, calculer σ_r au moyen de l'équation (15). Etant donné que la valeur σ_r des lames conductrices se dégrade jour après jour en raison de l'usure ou de l'oxydation de la surface métallique, la mesure doit être répétée chaque fois avant la mesure des spécimens à essayer. Il est préférable de polir la surface des lames conductrices lorsque la valeur σ_r se dégrade de plus de 10 %.

f) Mesure de la permittivité complexe du spécimen à essayer

De la même façon, mesurer les valeurs f_0 et Q_u du mode de résonance TE_{0m1} des spécimens à essayer. Calculer leurs valeurs ε' et $\tan \delta$ au moyen de l'équation (10).

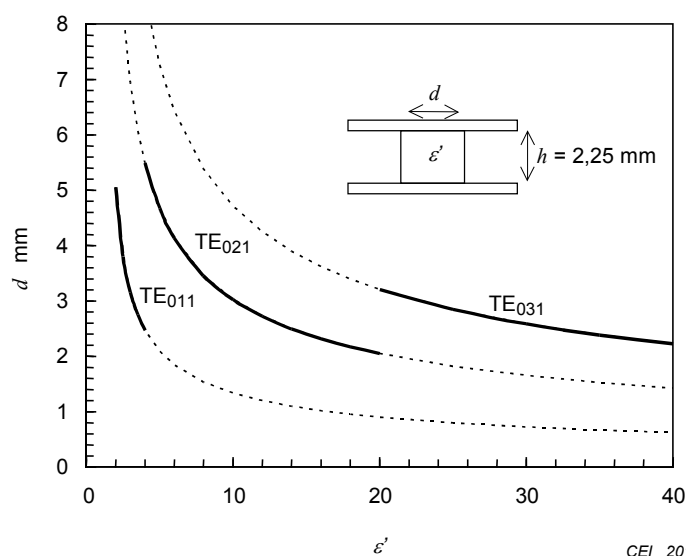


Figure 7 – Diamètre d des résonateurs en mode TE₀₁₁, TE₀₂₁ et TE₀₃₁ avec une fréquence de résonance de 60 GHz

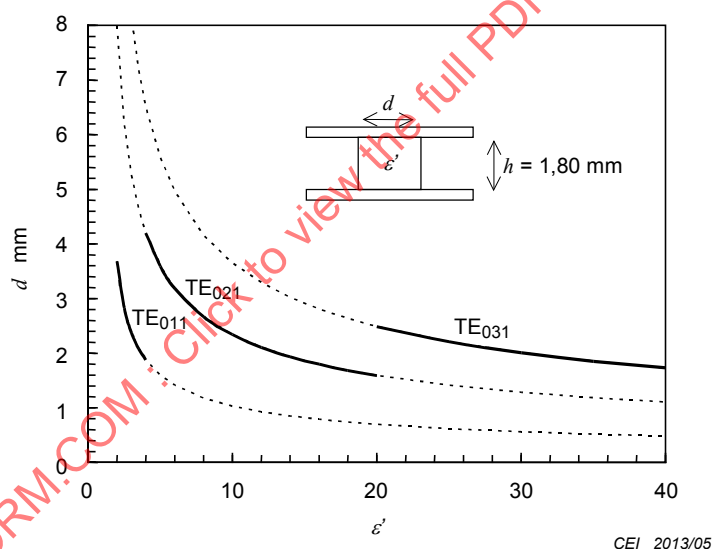


Figure 8 – Diamètre d des résonateurs en mode TE₀₁₁, TE₀₂₁ et TE₀₃₁ avec une fréquence de résonance de 77 GHz

4.4 Exemple de résultat de mesure

a) Résultat de mesure de la valeur σ_r des lames conductrices

Le Tableau 6 indique un résultat de mesure de la valeur σ_r des lames conductrices à 60 GHz. Les résonateurs saphirs de référence aux dimensions de 3,13 mm × 2,25 mm et 4,49 mm × 0,87 mm ont été utilisés pour la mesure. La hauteur $h_C = 2,279$ mm de l'appareil a été utilisée pour le calcul de σ_r . Les erreurs de mesure sont indiquées dans chaque colonne à l'aide du terme "±".

b) Résultats de mesure de ε' et $\tan \delta$

Le Tableau 7 indique les résultats de mesure de ε' et $\tan \delta$ à 57 GHz. Du saphir et du PTFE ont été utilisés comme spécimens à essayer. Les valeurs $\sigma_r = 80,5 \%$ et $h_C = 2,323$ ont été utilisées pour le calcul.

c) Résultats de mesure de TCF et $TC\varepsilon$

La Figure 10 illustre un résultat de mesure de dépendance en température pour la fréquence de résonance et la permittivité relative du verre en saphir à 60 GHz.

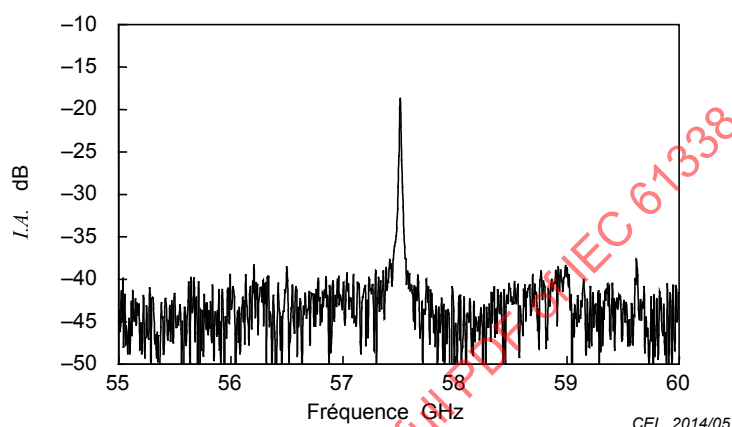


Figure 9 – Exemple de crête de résonance en mode TE_{021}

Tableau 6 – Résultats de mesure de la valeur σ_r des lames conductrices

Résonateurs de référence (Mode)	d mm	h mm	ε_e	G	f_0 GHz	IA_0 dB	Q_u	σ_r %	$\tan \delta$ 10^{-5}
Saphir (TE_{021})	3,130 $\pm 0,005$	2,250 $\pm 0,001$	0,910	1 197	59,876 $\pm 0,008$	19,0 $\pm 1,0$	8 782 ± 119	87	6,2
Saphir ($TE_{02\delta}$)	4,490 $\pm 0,004$	0,807 $\pm 0,001$	0,907	413	59,692 $\pm 0,047$	19,0 $\pm 0,3$	4 510 ± 50	± 4	$\pm 0,3$

Température: 20 °C, Humidité: 50 %

Tableau 7 – Résultats de mesure des valeurs ε' et $\tan \delta$ de spécimens en saphir et PTFE

Spécimen	Mode	d mm	h mm	f_0 GHz	IA_0 dB	Q_u	ε'	$\tan \delta$ 10^{-5}
Saphir -1	TE ₀₂₁	3,276 ±0,001	2,269 ±0,001	57,540 ±0,003	21,6 ±0,1	8 868 ±14	9,417 ±0,005	5,80 ±0,05
Saphir -2	TE ₀₂₁	3,277 ±0,001	2,261 ±0,001	57,528 ±0,010	21,7 ±0,1	8 972 ±40	9,416 ±0,007	5,65 ±0,06
PTFE -1	TE ₀₁₁	5,456 ±0,005	2,267 ±0,002	56,610 ±0,010	20,5 ±0,1	2 820 ±12	2,065 ±0,002	18,8 ±0,2
PTFE -2	TE ₀₁₁	5,443 ±0,004	2,266 ±0,002	56,640 ±0,013	20,1 ±0,1	2 816 ±14	2,066 ±0,002	18,9 ±0,3

Température: 25 °C, Humidité: 50 %

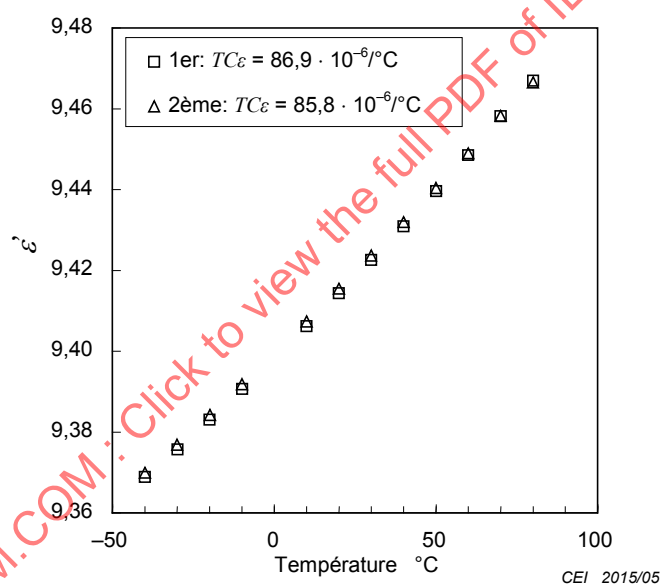


Figure 10a – Fréquence de résonance

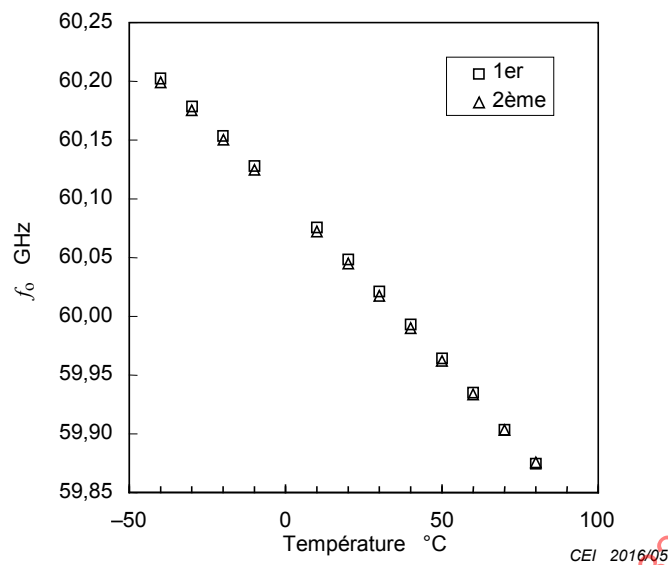


Figure 10b – Permittivité relative

Figure 10 – Résultat de mesure de dépendance en température des valeurs f_0 et ϵ' du saphir

5 Méthode de guide d'ondes de coupure excitée par des câbles coaxiaux présentant de petites boucles

5.1 Equipement et appareil de mesure

L'équipement et l'appareil de mesure sont les suivants:

a) Equipement de mesure

Le même équipement de mesure que celui utilisé pour la méthode du résonateur diélectrique en barreau est utilisé pour la méthode de guide d'ondes de coupure (Figure 1). Pour la mesure des propriétés diélectriques, seule l'information sur l'amplitude de la puissance transmise est exigée, c'est-à-dire que l'information concernant la phase de la puissance transmise n'est pas requise.

b) Appareil de mesure

La Figure 11a illustre un appareil de mesure de la permittivité complexe du spécimen diélectrique. L'appareil se compose du cylindre conducteur coupé en deux parties, à mi-hauteur, de deux absorbeurs d'ondes électromagnétiques dans les parties supérieure et inférieure du cylindre et de deux câbles semi-rigides avec de petites boucles. Un spécimen de lame diélectrique d'un diamètre d_s et d'une épaisseur de t est placé au milieu du cylindre et maintenu par des ergots.