

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Cavity resonator method to measure the complex permittivity of low-loss dielectric plates

Méthode de la cavité résonante pour mesurer la permittivité complexe des plaques diélectriques à faibles pertes

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62562:2010



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2010 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester.

If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: www.iec.ch

About the IEC

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

About IEC publications

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

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

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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

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

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

- Electropedia: www.electropedia.org

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

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

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

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

A propos de la CEI

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

A propos des publications CEI

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

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

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

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

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

- Electropedia: www.electropedia.org

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

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

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

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Cavity resonator method to measure the complex permittivity of low-loss dielectric plates

Méthode de la cavité résonante pour mesurer la permittivité complexe des plaques diélectriques à faibles pertes

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

R

ICS 17.220

ISBN 978-2-88910-931-9

CONTENTS

FOREWORD.....	3
1 Scope.....	5
2 Measurement parameters.....	5
3 Theory and calculation equations.....	6
3.1 Relative permittivity and loss tangent.....	6
3.2 Temperature dependence of ϵ' and $\tan \delta$	9
3.3 Cavity parameters.....	9
4 Measurement equipment and apparatus.....	10
4.1 Measurement equipment.....	10
4.2 Measurement apparatus for complex permittivity.....	11
5 Measurement procedure.....	12
5.1 Preparation of measurement apparatus.....	12
5.2 Measurement of reference level.....	12
5.3 Measurement of cavity parameters: D , H , σ_r , α_c , $TC\rho$	12
5.4 Measurement of complex permittivity of test specimen: ϵ' , $\tan \delta$	14
5.5 Temperature dependence of ϵ' and $\tan \delta$	14
Annex A (informative) Example of measured result and accuracy.....	15
Bibliography.....	18
Figure 1 – Resonator structures of two types.....	6
Figure 2 – Correction term $\Delta\epsilon'/\epsilon'_a$	8
Figure 3 – Correction terms $\Delta A/A$ and $\Delta B/B$	8
Figure 4 – Schematic diagram of measurement equipments.....	10
Figure 5 – Cavity resonator used for measurement.....	11
Figure 6 – Photograph of cavity resonator for measurement around 10 GHz.....	11
Figure 7 – Mode chart of cavity resonator.....	12
Figure 8 – Resonance peaks of cavity resonator.....	13
Figure 9 – Resonance frequency f_0 , insertion attenuation IA_0 and half-power band width f_{BW}	13
Figure 10 – Resonance frequency f_0 of TE_{011} mode of cavity resonator with dielectric plate ($D = 35$ mm, $H = 25$ mm).....	14
Figure A.1 – Measured temperature dependence of f_1 and Q_{uc}	16
Figure A.2 – Resonance peaks of cavity resonator clamping sapphire plate.....	16
Figure A.3 – Measured results of temperature dependence of f_0 , Q_u , ϵ' and $\tan \delta$ for sapphire plate.....	17
Table A.1 – Measured results of cavity parameters.....	15
Table A.2 – Measured results of ϵ' and $\tan \delta$ for sapphire plate.....	17

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

CAVITY RESONATOR METHOD TO MEASURE THE COMPLEX PERMITTIVITY OF LOW-LOSS DIELECTRIC PLATES

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 62562 has been prepared by subcommittee 46F: R.F. and microwave passive components, of IEC technical committee 46: Cables, wires, waveguides, R.F. connectors, R.F. and microwave passive components and accessories.

This first edition cancels and replaces the PAS published in 2008.

This bilingual version, published in 2010-02, corresponds to the English version.

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

CDV	Report on voting
46F/118/CDV	46F/143/RVC

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

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.

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

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62562:2010

CAVITY RESONATOR METHOD TO MEASURE THE COMPLEX PERMITTIVITY OF LOW-LOSS DIELECTRIC PLATES

1 Scope

The object of this International Standard is to describe a measurement method of dielectric properties in the planar direction of dielectric plate at microwave frequency. This method is called a cavity resonator method. It has been created in order to develop new materials and to design microwave active and passive devices for which standardization of measurement methods of material properties is more and more important.

This method has the following characteristics:

- the relative permittivity ε' and loss tangent $\tan \delta$ values of a dielectric plate sample can be measured accurately and non-destructively;
- temperature dependence of complex permittivity can be measured;
- the measurement accuracy is within 0,3 % for ε' and within 5×10^{-6} for $\tan \delta$;
- fringing effect is corrected using correction charts calculated on the basis of rigorous analysis.

This method is applicable for the measurements on the following condition:

- frequency : $2 \text{ GHz} < f < 40 \text{ GHz}$;
- relative permittivity: $2 < \varepsilon' < 100$;
- loss tangent : $10^{-6} < \tan \delta < 10^{-2}$.

2 Measurement parameters

The measurement parameters are defined as follows:

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon'' = D / (\varepsilon_0 E) \quad (1)$$

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

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

where

D is the electric flux density;

E is the electric field strength;

ε_0 is the permittivity in a vacuum;

ε' and ε'' are the real and imaginary components of the complex relative permittivity ε_r ;

$TC\varepsilon$ is the temperature coefficient of relative permittivity;

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

3 Theory and calculation equations

3.1 Relative permittivity and loss tangent

A resonator structure used in the nondestructive measurement of the complex permittivity is shown in Figure 1a.

A cavity having diameter D and length $H = 2M$ is cut into two halves in the middle of its length.

A dielectric plate sample having ε' , $\tan \delta$ and thickness t is placed between these two halves.

The TE_{011} mode, having only the electric field component tangential to the plane of the sample, is used for the measurement, since air gaps at the plate-cavity interfaces do not affect the electromagnetic field. Taking account of the fringing field in the plate region outside diameter of the cavity on the basis of the rigorous mode matching analysis, we determine ε' and $\tan \delta$ from the measured values of the resonant frequency f_0 and the unloaded Q -factor Q_u . This numerical calculation, however, is rather tedious.

Therefore,

- approximated values ε'_a and $\tan \delta_a$ from the f_0 and Q_u values by using simple formula for a resonator structure shown in Figure 1b, where a fringing effect for Figure 1a is neglected, will be determined;
- then, accurate values ε' and $\tan \delta$ from ε'_a and $\tan \delta_a$ using charts calculated from the rigorous analysis will be obtained.

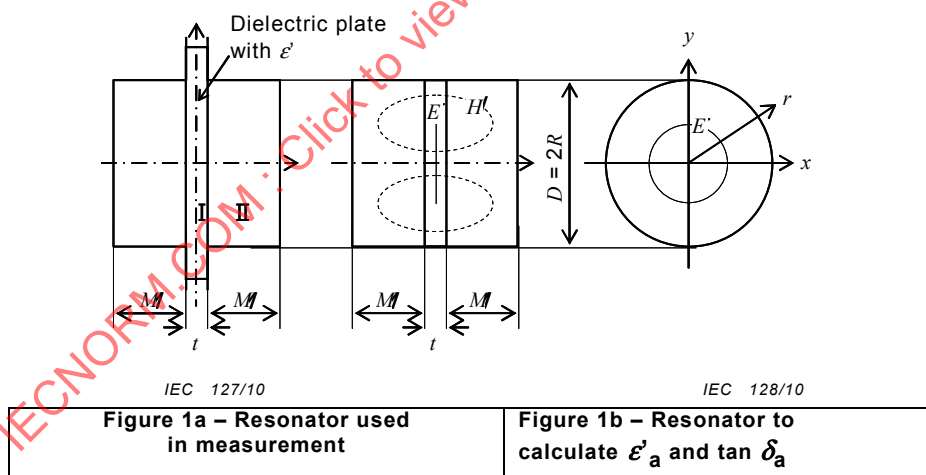


Figure 1 – Resonator structures of two types

The value of ε'_a is given by

$$\varepsilon'_a = \left(\frac{c}{\pi t f_0} \right)^2 \left\{ X^2 - Y^2 \left(\frac{t}{2M} \right)^2 \right\} + 1 \quad (4)$$

where c is the velocity of light in a vacuum ($c = 2,997\,9 \times 10^8$ m/s) and the first root X is calculated from a given value Y , using the following simultaneous equations:

$$X \tan X = \frac{t}{2M} Y \cot Y \quad (5)$$

$$Y = M\sqrt{k_0^2 - k_r^2} = jY' \quad (6)$$

with $k_0 = 2\pi f_0/c$, $k_r = j'_{01}/R$, and $j'_{01} = 3,83173$ for the TE_{011} mode. When $k_0 - k_r < 0$, Y is replaced by jY' .

The value of $\tan \delta_a$ is given by

$$\tan \delta_a = \frac{A}{Q_u} - R_s B \quad (7)$$

where R_s is the surface resistance of the conductor of cavity, given by

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu}{\sigma}} \quad (1/S), \quad \sigma = \sigma_0 \sigma_r \quad (S/m) \quad (8)$$

Here, μ and σ are the permeability and conductivity of the conductor. Furthermore, σ_r is the relative conductivity and $\sigma_0 = 5,8 \times 10^7$ S/m is the conductivity of standard copper. Constants A and B are given by

$$A = 1 + \frac{W_2^e}{W_1^e} \quad (9)$$

$$B = \frac{P_{cy1} + P_{cy2} + P_{end}}{\omega R_s W_1^e} \quad (10)$$

In the above, W_1^e and W_2^e are electric field energies stored in the dielectric plate of region 1 and air of region 2 shown in Figure 1a. Furthermore, P_{cy1} , P_{cy2} and P_{end} are the conductor loss at the cylindrical wall in the region 1, 2 and at the end wall. These parameters are given by

$$W_1^e = \frac{\pi}{8} \varepsilon_0 \varepsilon'_a \mu_0^2 \omega^2 j_{01}'^2 J_0^2(j_{01}') t \left(1 + \frac{\sin 2X}{2X} \right) \quad (11)$$

$$W_2^e = \frac{\pi}{4} \varepsilon_0 \mu_0^2 \omega^2 j_{01}'^2 J_0^2(j_{01}') M \left(1 - \frac{\sin 2Y}{2Y} \right) \frac{\cos^2 X}{\sin^2 Y} \quad (12)$$

$$P_{cy1} = \frac{\pi}{4} R_s J_0^2(j_{01}') t R k_r^4 \left(1 + \frac{\sin 2X}{2X} \right) \quad (13)$$

$$P_{cy2} = \frac{\pi}{2} R_s J_0^2(j_{01}') M R k_r^4 \left(1 - \frac{\sin 2Y}{2Y} \right) \frac{\cos^2 X}{\sin^2 Y} \quad (14)$$

$$P_{end} = \frac{\pi}{2} R_s j_{01}'^2 J_0^2(j_{01}') \left(\frac{Y}{M} \right)^2 \frac{\cos^2 X}{\sin^2 Y} \quad (15)$$

Then, accurate values of ε' and $\tan \delta$ are given by

$$\varepsilon' = \varepsilon'_a \left(1 - \frac{\Delta \varepsilon'}{\varepsilon'_a} \right) \quad (16)$$

$$\tan \delta = \frac{A}{Q_u} \left(1 + \frac{\Delta A}{A} \right) - R_s B \left(1 + \frac{\Delta B}{B} \right) \quad (17)$$

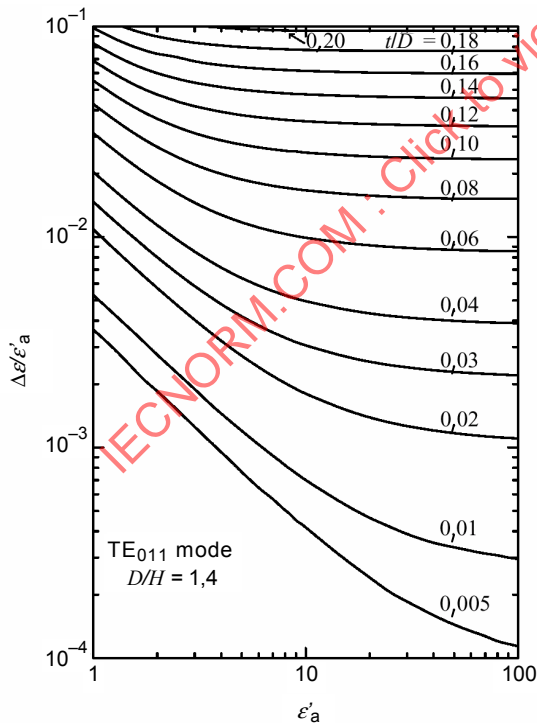
where correction terms due to the fringing field $\Delta \epsilon' / \epsilon'_a$, $\Delta A / A$ and $\Delta B / B$ are calculated numerically on the basis of rigorous mode matching analysis using the Ritz-Galerkin method, as shown in Figures 2 and 3. It is found from the analysis for a circular dielectric plate with diameter d that f_0 converges to a constant value for $d/D > 1,2$. The correction terms shown in Figures 2 and 3 were calculated for $d/D > 1,5$. Therefore, the correction terms are applicable to dielectric plates with any shape if $d/D > 1,2$.

Measurement uncertainties of ϵ' and $\tan \delta$, $\Delta \epsilon'$ and $\Delta \tan \delta$ are estimated as the mean square errors and given respectively by

$$(\Delta \epsilon')^2 = (\Delta \epsilon'_f)^2 + (\Delta \epsilon'_t)^2 + (\Delta \epsilon'_D)^2 + (\Delta \epsilon'_H)^2 \quad (18)$$

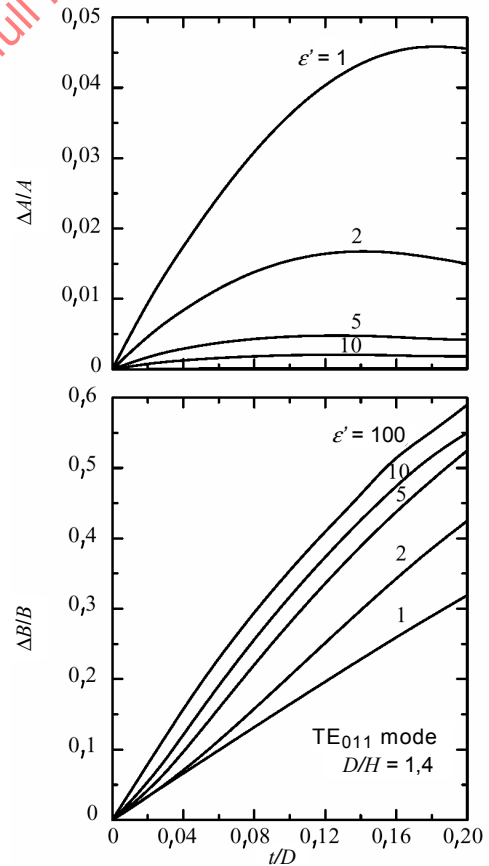
$$(\Delta \tan \delta)^2 = (\Delta \tan \delta_Q)^2 + (\Delta \tan \delta_\sigma)^2 \quad (19)$$

where $\Delta \epsilon'_f$, $\Delta \epsilon'_t$, $\Delta \epsilon'_D$ and $\Delta \epsilon'_H$ are the uncertainties of ϵ' due to standard deviations of f_0 , t , D , and H , respectively. Also, $\Delta \tan \delta$ is mainly attributed to measurement errors of Q_u and σ_r , and $\Delta \tan \delta_Q$ and $\Delta \tan \delta_\sigma$ are uncertainties of $\tan \delta$ due to standard deviations of them, respectively.



IEC 129/10

Figure 2 – Correction term $\Delta \epsilon' / \epsilon'_a$



IEC 130/10

Figure 3 – Correction terms $\Delta A / A$ and $\Delta B / B$

3.2 Temperature dependence of ε' and $\tan\delta$

Temperature dependence of ε' and $\tan\delta$ also can be measured using this method. Temperature coefficient of relative permittivity $TC\varepsilon$ is calculated by equation (3).

When the temperature dependences of ε' is linear, particularly, $\varepsilon'(T)$ is given by

$$\varepsilon'(T) = \varepsilon'(T_0)[1 + TC\varepsilon(T - T_0)] \quad (20)$$

where T and T_0 are the temperatures in measurement and the reference temperature, respectively. In this case, $TC\varepsilon$ can be determined by the least squares method for many measurement points against T .

The thermal linear expansion coefficient of the dielectric plate α and that of the conductor cavity α_c should be considered in the $TC\varepsilon$ measurement. Furthermore, the temperature coefficient of resistivity $TC\rho$ should be considered in the temperature dependence measurement of $\tan\delta$. Using these parameters, temperature dependent values of $t(T)$, $D(T)$, $H(T)$, and $\rho(T)$ are given by

$$t(T) = t(T_0)[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (21)$$

$$D(T) = D(T_0)[1 + \alpha_c(T - T_0)] \quad (22)$$

$$H(T) = H(T_0)[1 + \alpha_c(T - T_0)] \quad (23)$$

$$\rho(T) = \frac{1}{\sigma(T)} = \rho(T_0)[1 + TC\rho(T - T_0)] \quad (24)$$

3.3 Cavity parameters

Cavity parameters such as D , $H = 2M$, α_c , σ_r and $TC\rho$ are determined from the measurements for the TE_{011} and TE_{012} resonance modes of an empty cavity without a sample, in advance of complex permittivity measurements. At first, D and H are determined from two measured resonant frequencies, f_1 for the TE_{011} mode and f_2 for the TE_{012} mode, by using

$$D = \frac{cj'_{01}}{\pi} \sqrt{\frac{3}{4f_1^2 - f_2^2}} \quad (25)$$

$$H = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{3}{f_2^2 - f_1^2}} \quad (26)$$

which can be derived easily from the resonance condition of the cavity.

Secondly, α_c is determined from the measurement of temperature dependence of f_1 , by using

$$\alpha_c = -\frac{1}{f_1} \frac{\Delta f_1}{\Delta T} \quad (27)$$

Thirdly, σ_r is determined from the measured values D , H , f_1 , Q_{uc} , which is the unloaded Q -factor for the TE_{011} mode, by the following equation:

$$\sigma_r = \frac{4\pi f_1 Q_{uc}^2 \left\{ j'_{01}{}^2 + 2\pi^2 \left(\frac{D}{2H} \right)^3 \right\}^2}{\sigma_0 \mu_0 c^2 \left\{ j'_{01}{}^2 + \left(\frac{\pi D}{2H} \right)^2 \right\}^3} \quad (28)$$

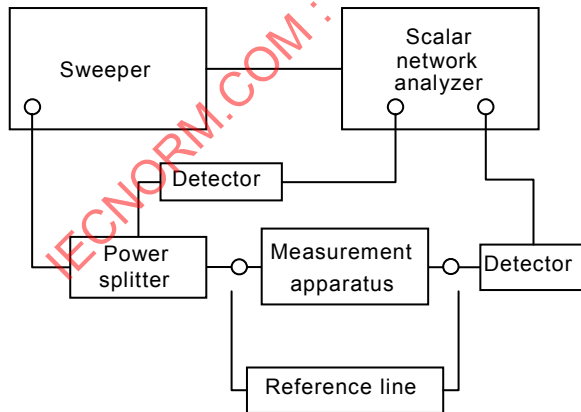
Finally, $TC\rho$ is determined from the measurement of temperature dependence of $\rho_r = \sigma_0/\sigma$ by using

$$TC\rho = \frac{1}{\rho_r} \frac{\Delta \rho_r}{\Delta T} \quad (29)$$

4 Measurement equipment and apparatus

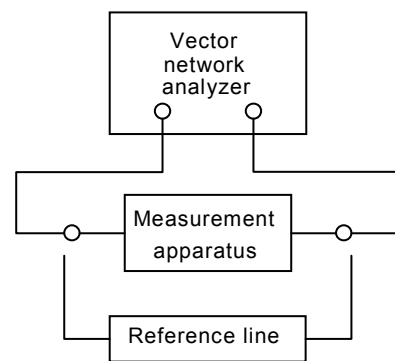
4.1 Measurement equipment

Figure 4 shows a schematic diagram of two equipment systems required for millimetre wave measurement. 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. Therefore, a scalar network analyzer can be used for the measurement shown in Figure 4a. However, a vector network analyzer, as shown in Figure 4b, has an advantage in precision of the measurement data.



IEC 131/10

Figure 4a – Scalar network analyzer system



IEC 132/10

Figure 4b – Vector network analyzer system

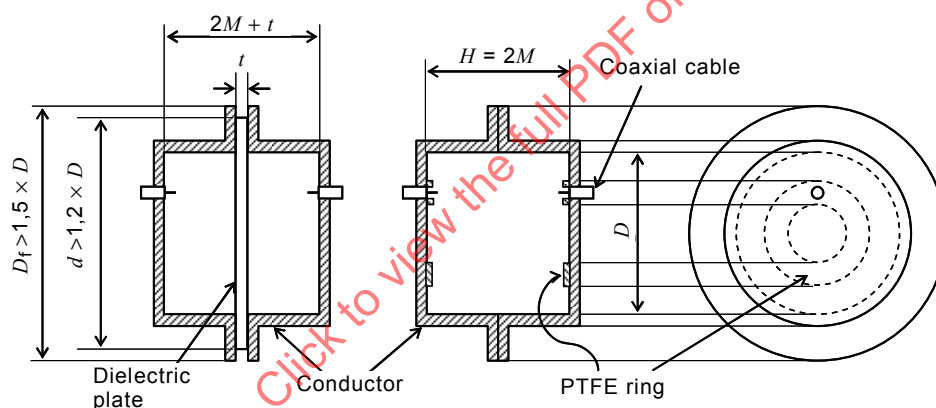
Figure 4 – Schematic diagram of measurement equipments

4.2 Measurement apparatus for complex permittivity

The structure of the cavity resonator used in the complex permittivity measurement is shown in Figure 5. A cylindrical cavity containing two cup-shaped parts is machined from a copper block. The cavity resonator has $D = 35$ mm, $H = 25$ mm and a flange diameter $D_f > 1,5$ mm for the measurement around 10 GHz. A specimen with diameter $d > 1,2 \times D$ is placed between the two parts and clamped with clips to fix this structure. This cavity resonator is excited by the two semi-rigid coaxial cables, each of which has a small loop at the top. The transmission-type resonator is constituted and under-coupled equally to the input and output loops with setting $S_{11} = S_{22}$. The photograph is shown in Figure 6.

The resonance frequency f_0 , half-power band width f_{BW} , and the insertion attenuation IA_0 (dB) at f_0 are measured using a network analyzer by means of the swept-frequency method. The value of Q_u is given by

$$Q_u = \frac{Q_L}{1 - 10^{-IA_0(\text{dB})/20}}, \quad Q_L = \frac{f_0}{f_{BW}} \quad (30)$$



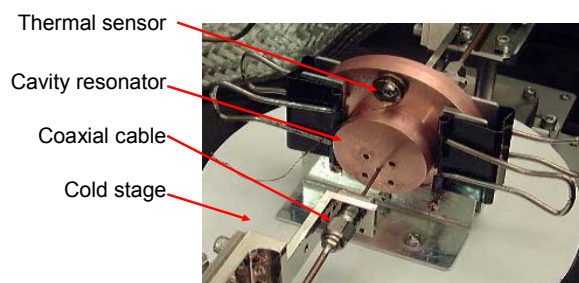
IEC 133/10

IEC 134/10

Figure 5a – Resonator clamping dielectric specimen

Figure 5b – Empty cavity resonator

Figure 5 – Cavity resonator used for measurement



IEC 135/10

Figure 6 – Photograph of cavity resonator for measurement around 10 GHz

5 Measurement procedure

5.1 Preparation of measurement apparatus

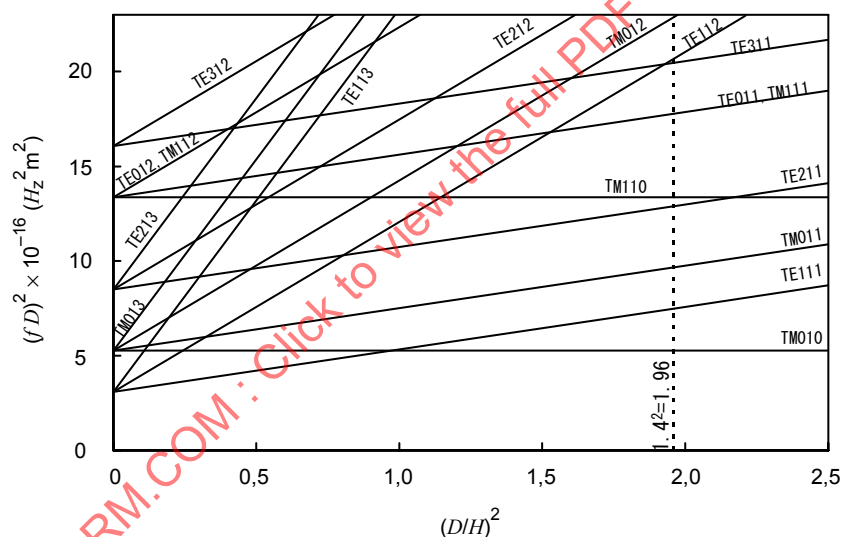
Set up the measurement equipment and apparatus as shown in Figure 4. The cavity resonator and dielectric specimens shall be kept in a clean and dry state, as high humidity degrades unloaded Q . The relative humidity shall preferably be less than 60 %.

5.2 Measurement of reference level

The reference level, level of full transmission power, is measured first. Connect the reference line to the measurement equipment and measure the full transmission power level over the entire measurement frequency range.

5.3 Measurement of cavity parameters: D , H , σ_r , α_c , $TC\rho$

Rough values of f_1 of the TE_{011} resonance mode and f_2 of the TE_{012} resonance modes can be estimated from the mode chart shown in Figure 7. Resonance peaks of cavity resonator with $D = 35$ mm and $H = 25$ mm are shown in Figure 8.



IEC 136/10

Figure 7 – Mode chart of cavity resonator

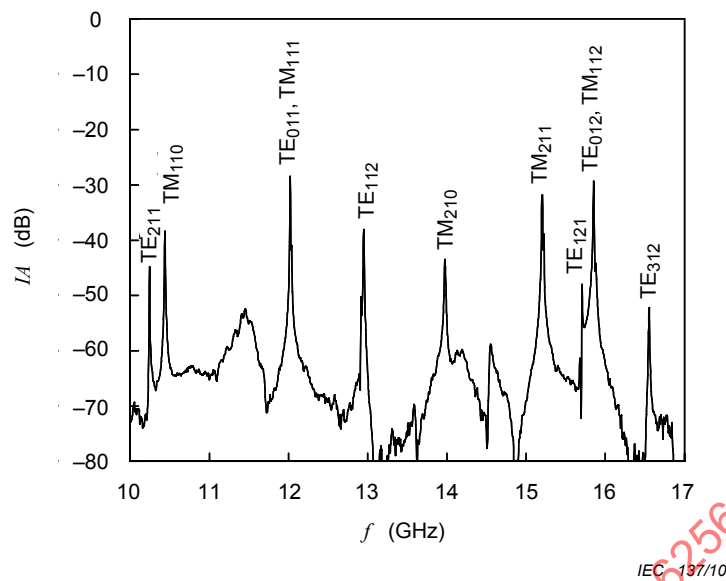


Figure 8 – Resonance peaks of cavity resonator

Attach PTFE rings to the end plates of the cavity to separate the degenerate $TM_{11\ell}$ ($\ell=1, 2$) modes from the $TE_{01\ell}$ modes, as shown in Figure 5. 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, as shown in Figure 9.

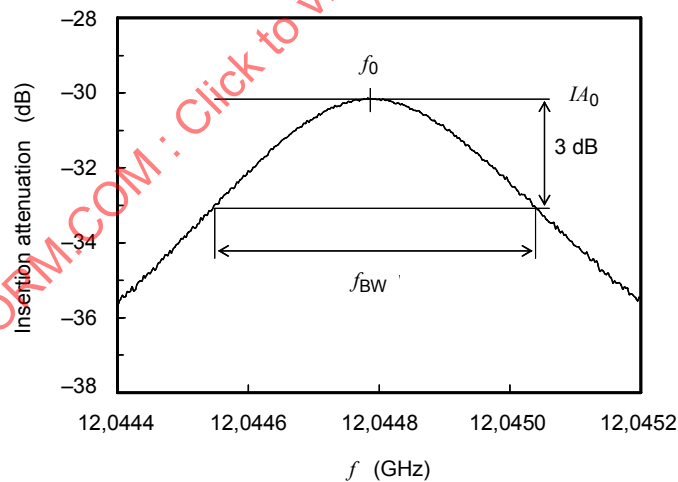


Figure 9 – Resonance frequency f_0 , insertion attenuation IA_0 and half-power band width f_{BW}

Measure f_1 and Q_{uc} of the TE_{011} resonance mode and measure f_2 of the TE_{012} resonance modes. Calculate Q_{u1} by using equation (30). Calculate the dimensions D , H , and σ_r of cavity resonator from equations (25), (26) and (28). Since the value of σ_r degrades due to oxidation of the metal surface, it shall be measured periodically. Next, measure temperature dependence of f_1 and Q_{uc} using the cavity placed in a temperature-stabilized oven. Calculate α_c and $TC\rho$ from equations (27) and (29).

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

Place the test specimen between two cylinders and clamp them by clips, as shown in Figure 6. Estimate a rough value of f_0 of the TE_{011} resonance mode from Figure 10. Then, measure f_0 and Q_u values. Calculate ε' and $\tan\delta$ values using equations (4) to (17).

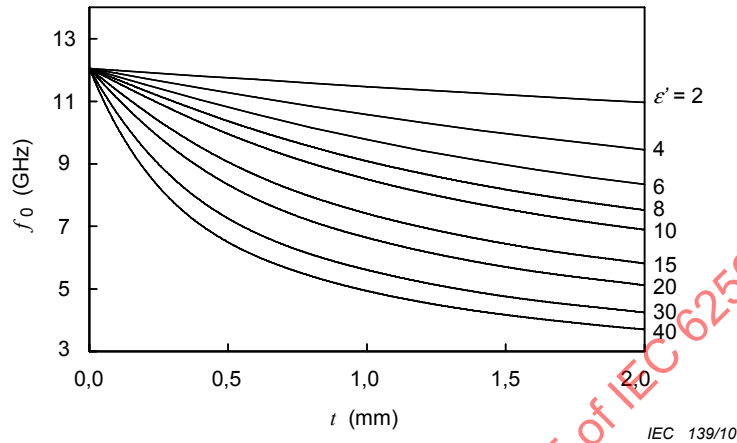


Figure 10 – Resonance frequency f_0 of TE_{011} mode of cavity resonator with dielectric plate ($D = 35$ mm, $H = 25$ mm)

5.5 Temperature dependence of ε' and $\tan\delta$

Place a cavity resonator clamping the dielectric plate in a temperature-stabilized oven, and measure f_0 and Q_u as a function of temperature T . Calculate ε' and $\tan\delta$ values as a function of T , taking account of α , α_c , and $TC\rho$. Then, calculate $TC\varepsilon$ by using equation (3) or by the least squares method for many measurement points against T .

Annex A (informative)

Example of measured result and accuracy

A.1 Cavity parameters

Table A.1 shows measured results of cavity parameters. As shown in this table, D and H can be determined accurately to μm order using f_1 and f_2 . The value of σ_r depends on the surface roughness and the oxidation of the internal wall of the cavity and is desired to be higher than 80 % to keep high accuracy in the $\tan\delta$ measurement.

Table A.1 – Measured results of cavity parameters

$f_1(\text{GHz})$ for TE_{011}	$f_2(\text{GHz})$ for TE_{012}	Q_u for TE_{011}	D mm	H mm	α_c ppm/K	σ_r %	$TC\rho$ 1/K
12,045 6 $\pm 0,000\ 2$	15,936 $\pm 0,001$	24 256 ± 145	35,053 $\pm 0,001$	24,884 $\pm 0,002$	15,5 $\pm 0,3$	84,4 $\pm 1,0$	0,003 4 $\pm 0,000\ 3$

Measured results of temperature dependence of f_1 and Q_{uc} for an empty cavity resonator are shown in Figure A.1. The value of α_c in Table A.1 was determined from the temperature dependence of f_1 using equation (27). Furthermore, $TC\rho$ was determined from the temperature dependence of Q_{uc} using equation (29). In these calculations, $\Delta f_1/\Delta T$ and $\Delta\rho_r/\Delta T$ were determined by the least squares method. The values of α_c are nearly equal with nominal value of 16,5 ppm/K¹⁾ of copper. The values of $TC\rho$ are around the nominal value $TC\rho = 0,003\ 9$ (1/K) of copper at DC.

1) ppm = parts per million

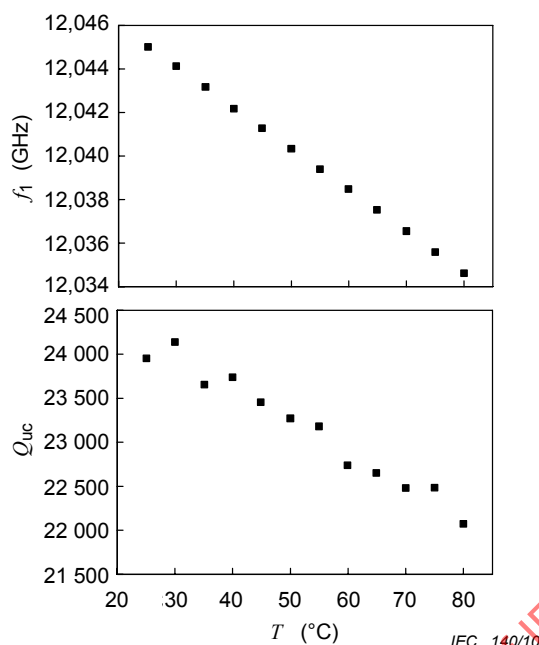


Figure A.1 – Measured temperature dependence of f_1 and Q_{uc}

A.2 Relative permittivity ϵ' and $\tan \delta$

Figure A.2 shows measured resonance peaks of cavity resonator clamping sapphire plate and Table A.2 shows measured values of ϵ' and $\tan \delta$ for the sapphire plate with $t = 0,958 \pm 0,002$ mm at room temperature. The values of ϵ' are the perpendicular component of relative permittivity against c-axis. Measurement errors $\Delta \epsilon'$ and $\Delta \tan \delta$ were calculated by using equations (18) and (19). A main cause of $\Delta \epsilon'$ is uncertainty of the sample thickness.

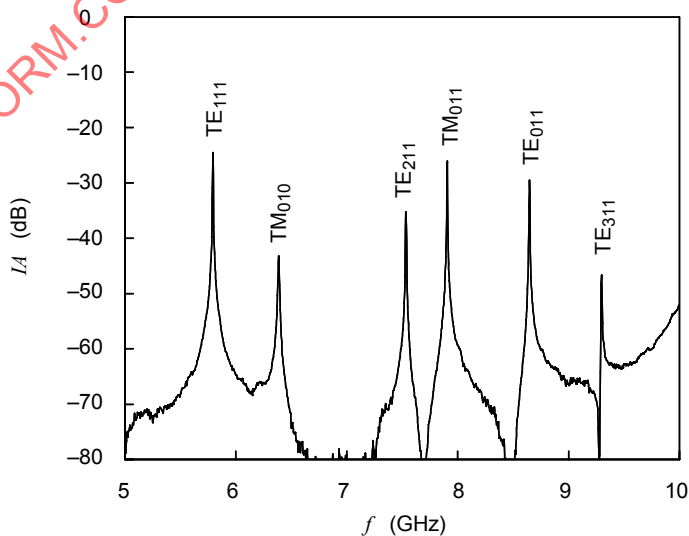
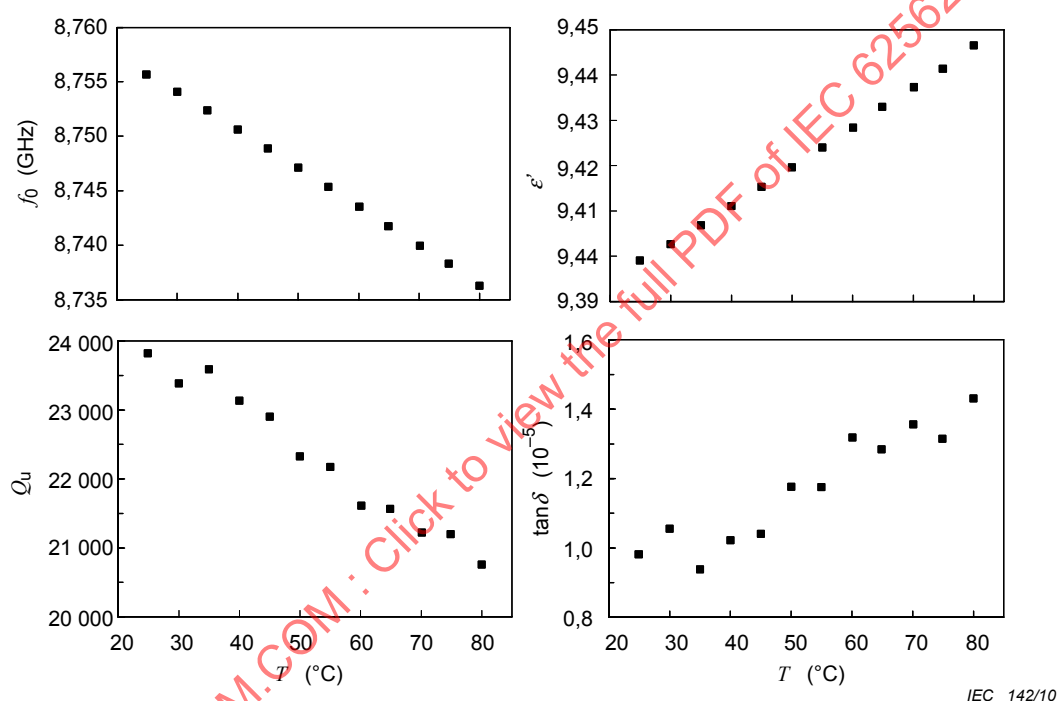


Figure A.2 – Resonance peaks of cavity resonator clamping sapphire plate

Table A.2 – Measured results of ε' and $\tan\delta$ for sapphire plate

f_0 (GHz)	Q_u	ε'	$\tan\delta$ (10^{-5})	σ_r (%)
8,754 6	24 043	9,404	0,91	84,4
$\pm 0,000$ 1	± 165	$\pm 0,017$	$\pm 0,06$	$\pm 1,0$

Figure A.3 shows measured results of temperature dependence of f_0 , Q_u , ε' and $\tan\delta$ for the sapphire plate. The value of ε' decreases linearly and $\tan\delta$ increases approximately linearly, with increasing T . Value of $TC\varepsilon$ was determined to be 92 ppm/K using by the least squares method from ε' values against T .



IEC 142/10

Figure A.3 – Measured results of temperature dependence of f_0 , Q_u , ε' and $\tan\delta$ for sapphire plate

A.3 Measurement accuracy

By a round robin test [3]²⁾ for the cavity resonance method, the accuracy of this method was estimated to be within 0,3 % for ε' , within 4 % for $\tan\delta$ of 10^{-4} and 20 % for that of 10^{-6} . The measurement resolution of $TC\varepsilon$ is estimated to be 1 ppm/K for $TC\varepsilon$ of -10 ppm/K, and to be 3 ppm/K for $TC\varepsilon$ of 90 ppm/K. This high measurement accuracy and resolution are acceptable for most practical applications for microwave planar circuits.

2) Figures in square brackets refer to the Bibliography.

Bibliography

- [1] KOBAYASHI Y. and SATO J., "Complex permittivity measurement of dielectric plates by a cavity resonance method", IEICE Technical Report, MW88-40, pp.43-50, Nov. 1988.
 - [2] KOBAYASHI Y. and SATO J., "Improved cavity resonance method for nondestructive measurement of complex permittivity of dielectric plate.", 1988 Conf. of Precision Electromagnetic Measurements, Digest, pp. 147-148, June 1988.
 - [3] KOBAYASHI Y. and NAKAYAMA A., "Round Robin Test on a Cavity Resonance Method to Measure Complex Permittivity of Dielectric Plates at Microwave Frequency" IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, vol 13. pp. 751-759, August 2006.
 - [4] KENT G., "An evanescent-mode tester for ceramic dielectric substrates," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol 36, pp. 1451-1454, Oct. 1988.
 - [5] KENT G., "Non destructive permittivity measurement of substrates," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 45, pp. 102-106, Feb. 1996.
 - [6] KENT G. and BELL S., "The gap correction for the resonant-mode dielectrometer," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 45, pp. 98-101, Feb. 1996.
 - [7] SHIMIZU T. and KOBAYASHI Y., "Cut-off circular waveguide method for dielectric substrate measurement in millimeter wave range", IEICE Trans., Electron., vol. E87-C, no.5, May 2004.
-

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62562:2010

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	21
1 Domaine d'application	23
2 Paramètres de mesure	23
3 Théorie et équations de calcul	24
3.1 Permittivité relative et tangente de l'angle de perte	24
3.2 Dépendance vis-à-vis de la température de ε' et $\tan \delta$	27
3.3 Paramètres de la cavité	28
4 Matériel et appareil de mesure	29
4.1 Matériel de mesure	29
4.2 Appareil de mesure de la permittivité complexe	29
5 Mode opératoire de mesure	30
5.1 Préparation de l'appareil de mesure	30
5.2 Mesure du niveau de référence	31
5.3 Mesure des paramètres de la cavité: D , H , σ_r , α_c , $TC\rho$	31
5.4 Mesure de la permittivité complexe de l'éprouvette: ε' , $\tan \delta$	33
5.5 Dépendance de ε' et de $\tan \delta$ vis-à-vis de la température	33
Annexe A (informative) Exemple de résultat mesuré et précision	34
Bibliographie	37
Figure 1 – Structures de résonateur de deux types	25
Figure 2 – Terme correctif $\Delta\varepsilon'/\varepsilon'_a$	27
Figure 3 – Termes correctifs $\Delta A/A$ et $\Delta B/B$	27
Figure 4 – Dessin schématique du matériel de mesure	29
Figure 5 – Cavité résonante utilisée pour la mesure	30
Figure 6 – Photographie d'une cavité résonante pour des mesures à 10 GHz environ	30
Figure 7 – Abaque des modes de la cavité résonante	31
Figure 8 – Crêtes de résonance de la cavité résonante	32
Figure 9 – Fréquence de résonance f_0 , affaiblissement d'insertion IA_0 et largeur de bande à demi-puissance f_{BW}	32
Figure 10 – Fréquence de résonance f_0 du mode TE_{011} de la cavité résonante avec plaque diélectrique ($D = 35$ mm, $H = 25$ mm)	33
Figure A.1 – Mesure de la dépendance de f_1 et Q_{uc} vis-à-vis de la température	35
Figure A.2 – Crêtes de résonance de la plaque de serrage en saphir de la cavité résonante	35
Figure A.3 – Résultats mesurés de la dépendance de f_0 , Q_u , ε' et $\tan \delta$ vis-à-vis de la température pour la plaque en saphir	36
Tableau A.1 – Résultats mesurés des paramètres de la cavité	34
Tableau A.2 – Résultats mesurés de ε' et de $\tan \delta$ pour la plaque en saphir	36

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**MÉTHODE DE LA CAVITÉ RÉSONANTE
POUR MESURER LA PERMITTIVITÉ COMPLEXE
DES PLAQUES DIÉLECTRIQUES À FAIBLES PERTES**

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 62562 a été établie par le sous-comité 46F: Systèmes microélectromécaniques, du comité d'études 46 de la CEI: Câbles, fils, guides d'ondes, connecteurs, composants passifs pour micro-onde et accessoires.

La présente version bilingue, publiée en 2010-02, correspond à la version anglaise.

Le texte anglais de cette norme est issu des documents 46F/118/CDV et 46F/143/RVC.

Le rapport de vote 46F/143/RVC 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.

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

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

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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62562:2010

MÉTHODE DE LA CAVITÉ RÉSONANTE POUR MESURER LA PERMITTIVITÉ COMPLEXE DES PLAQUES DIÉLECTRIQUES À FAIBLES PERTES

1 Domaine d'application

L'objet de la présente Norme internationale est de décrire une méthode de mesure des propriétés diélectriques en hyperfréquence dans la direction du plan d'une plaque diélectrique. Cette méthode est appelée méthode de la cavité résonante. Elle a été créée pour élaborer de nouveaux matériaux et pour concevoir des dispositifs micro-ondes actifs et passifs pour lesquels la normalisation des méthodes de mesure des propriétés des matériaux est de plus en plus importante.

Cette méthode a les caractéristiques suivantes:

- on peut mesurer de façon précise et non destructive les valeurs de la permittivité relative ε' et de la tangente de l'angle de perte $\tan \delta$ d'un échantillon de plaque diélectrique;
- on peut mesurer la dépendance de la permittivité complexe vis-à-vis de la température;
- la précision de mesure est inférieure ou égale à 0,3 % pour ε' et inférieure ou égale à 5×10^{-6} pour $\tan \delta$;
- on corrige l'effet de frange en utilisant des abaques de correction calculés en se fondant sur une analyse rigoureuse.

Cette méthode est applicable pour effectuer des mesures dans les conditions suivantes:

- fréquence : $2 \text{ GHz} < f < 40 \text{ GHz}$;
- permittivité relative : $2 < \varepsilon' < 100$;
- tangente de l'angle de perte : $10^{-6} < \tan \delta < 10^{-2}$.

2 Paramètres de mesure

Les paramètres de mesure sont définis comme suit:

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon'' = D / (\varepsilon_0 E) \quad (1)$$

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

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

où

- D est l'induction électrique;
- E est l'intensité de champ électrique;
- ε_0 est la permittivité dans le vide;

ε' et ε'' sont les composantes réelle et imaginaire de la permittivité relative complexe ε_r ;
 $TC\varepsilon$ est le coefficient de température de la permittivité relative ;
 ε_T et ε_{ref} sont respectivement les parties réelles de la permittivité relative complexe à la température T et à la température de référence T_{ref} ($= 20\text{ °C}$ à 25 °C).

3 Théorie et équations de calcul

3.1 Permittivité relative et tangente de l'angle de perte

Une structure de résonateur utilisée dans la mesure non destructive de la permittivité complexe est représentée à la Figure 1a.

Une cavité ayant un diamètre D et une longueur $H = 2M$ est découpée en deux moitiés au milieu de sa longueur.

Un échantillon de plaque diélectrique avec ε' , $\tan\delta$ et une épaisseur t est disposé entre ces deux moitiés.

Le mode TE_{011} , dont seule la composante du champ électrique est tangente au plan de l'échantillon, est utilisé pour la mesure, car les espaces d'air aux interfaces plaque-cavité n'ont pas d'influence sur le champ électromagnétique. En tenant compte du champ de franges dans le diamètre extérieur de la région de plaque de la cavité et en se basant sur l'analyse rigoureuse de l'adaptation de mode, on détermine ε' et $\tan\delta$ d'après les valeurs mesurées de la fréquence de résonance f_0 et du facteur Q à vide Q_u . Ce calcul numérique est toutefois relativement pénible.

C'est pourquoi,

- des valeurs approchées ε'_a et $\tan\delta_a$ vont être déterminées d'après les valeurs de f_0 et Q_u en utilisant une formule simple pour une structure de résonateur représentée à la Figure 1b, où on néglige l'effet de frange sur la Figure 1a;
- des valeurs précises ε' et $\tan\delta$ de ε'_a et $\tan\delta_a$ vont ensuite être obtenues en utilisant les abaques calculés d'après l'analyse rigoureuse.

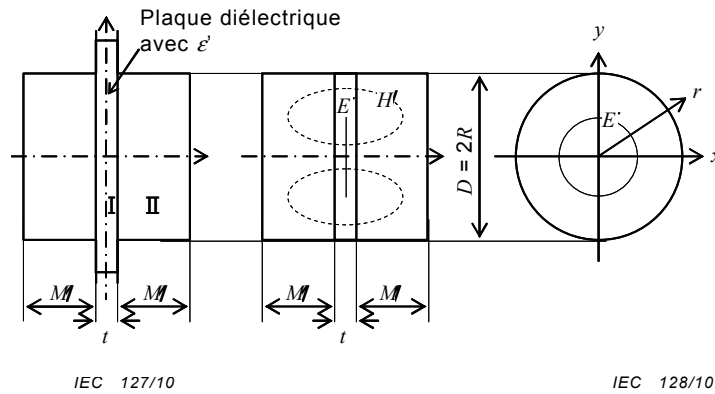


Figure 1a – Résonateur utilisé pour la mesure

Figure 1b – Résonateur pour le calcul de ε'_a et $\tan \delta_a$

Figure 1 – Structures de résonateur de deux types

La valeur de ε'_a est donnée par

$$\varepsilon'_a = \left(\frac{c}{\pi t f_0} \right)^2 \left\{ X^2 - Y^2 \left(\frac{t}{2M} \right)^2 \right\} + 1 \quad (4)$$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide ($c = 2,9979 \times 10^8$ m/s) et la première inconnue X est calculée à partir d'une valeur donnée Y en utilisant le système d'équations suivant:

$$X \tan X = \frac{t}{2M} Y \cot Y \quad (5)$$

$$Y = M \sqrt{k_0^2 - k_r^2} = jY' \quad (6)$$

avec $k_0 = 2\pi f_0 / c$, $k_r = j'_{01} / R$, et $j'_{01} = 3,83173$ pour le mode TE_{011} . Lorsque $k_0 - k_r < 0$, on remplace Y par jY' .

La valeur de $\tan \delta_a$ est donnée par

$$\tan \delta_a = \frac{A}{Q_u} - R_s B \quad (7)$$

où R_s est la résistance de surface du conducteur de la cavité, donnée par

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu}{\sigma}} \quad (1/S), \quad \sigma = \sigma_0 \sigma_r \quad (S/m) \quad (8)$$

μ et σ sont ici la perméabilité et la conductivité du conducteur. De plus, σ_r est la conductivité relative et $\sigma_0 = 5,8 \times 10^7$ S/m est la conductivité du cuivre standard. Les constantes A et B sont données par

$$A = 1 + \frac{W_2^e}{W_1^e} \quad (9)$$

$$B = \frac{P_{cy1} + P_{cy2} + P_{end}}{\omega R_s W_1^e} \quad (10)$$

W_1^e et W_2^e sont les énergies du champ électrique stockées dans la plaque diélectrique de la région 1 et l'air de la région 2 représentée sur la Figure 1a. De plus, P_{cy1} , P_{cy2} et P_{end} sont les pertes dans le conducteur sur la paroi cylindrique dans les régions 1, 2 et sur la paroi d'extrémité. Ces paramètres sont donnés par

$$W_1^e = \frac{\pi}{8} \varepsilon_0 \varepsilon'_a \mu_0^2 \omega^2 j_{01}^2 J_0^2(j'_{01}) t \left(1 + \frac{\sin 2X}{2X} \right) \quad (11)$$

$$W_2^e = \frac{\pi}{4} \varepsilon_0 \mu_0^2 \omega^2 j_{01}^2 J_0^2(j'_{01}) M \left(1 - \frac{\sin 2Y}{2Y} \right) \frac{\cos^2 X}{\sin^2 Y} \quad (12)$$

$$P_{cy1} = \frac{\pi}{4} R_s J_0^2(j'_{01}) t R k_r^4 \left(1 + \frac{\sin 2X}{2X} \right) \quad (13)$$

$$P_{cy2} = \frac{\pi}{2} R_s J_0^2(j'_{01}) M R k_r^4 \left(1 - \frac{\sin 2Y}{2Y} \right) \frac{\cos^2 X}{\sin^2 Y} \quad (14)$$

$$P_{end} = \frac{\pi}{2} R_s j_{01}^2 J_0^2(j'_{01}) \left(\frac{Y}{M} \right)^2 \frac{\cos^2 X}{\sin^2 Y} \quad (15)$$

Des valeurs précises de ε' et $\tan \delta$ sont alors données par

$$\varepsilon' = \varepsilon'_a \left(1 - \frac{\Delta \varepsilon'}{\varepsilon'_a} \right) \quad (16)$$

$$\tan \delta = \frac{A}{Q_u} \left(1 + \frac{\Delta A}{A} \right) - R_s B \left(1 + \frac{\Delta B}{B} \right) \quad (17)$$

où on calcule numériquement les termes correctifs dus au champ de franges $\Delta \varepsilon' / \varepsilon'_a$, $\Delta A / A$ et $\Delta B / B$ en se fondant sur l'analyse rigoureuse d'adaptation de mode en utilisant la méthode de Ritz-Galerkin, comme représenté sur les Figures 2 et 3. D'après l'analyse, pour une plaque diélectrique circulaire de diamètre d , on trouve que f_0 converge vers une valeur constante pour $d/D > 1,2$. Les termes correctifs représentés sur les Figures 2 et 3 ont été calculés pour $d/D > 1,5$. Les termes correctifs sont donc applicables à des plaques diélectriques de forme quelconque si $d/D > 1,2$.

On estime les incertitudes de mesure de ε' et $\tan \delta$, $\Delta \varepsilon'$ et $\Delta \tan \delta$ comme les erreurs quadratiques moyennes et elles sont respectivement données par

$$(\Delta \varepsilon')^2 = (\Delta \varepsilon'_f)^2 + (\Delta \varepsilon'_t)^2 + (\Delta \varepsilon'_D)^2 + (\Delta \varepsilon'_H)^2 \quad (18)$$

$$(\Delta \tan \delta)^2 = (\Delta \tan \delta_Q)^2 + (\Delta \tan \delta_\sigma)^2 \quad (19)$$

où $\Delta \varepsilon'_f$, $\Delta \varepsilon'_t$, $\Delta \varepsilon'_D$ et $\Delta \varepsilon'_H$ sont les incertitudes de ε' dues respectivement aux écarts-type de f_0 , t , D , et H . D'autre part, $\Delta \tan \delta$ est attribué principalement aux erreurs de mesure de Q_u and σ_r , et $\Delta \tan \delta_Q$ et $\Delta \tan \delta_\sigma$ sont respectivement les incertitudes de $\tan \delta$ dues à leurs écarts-type.

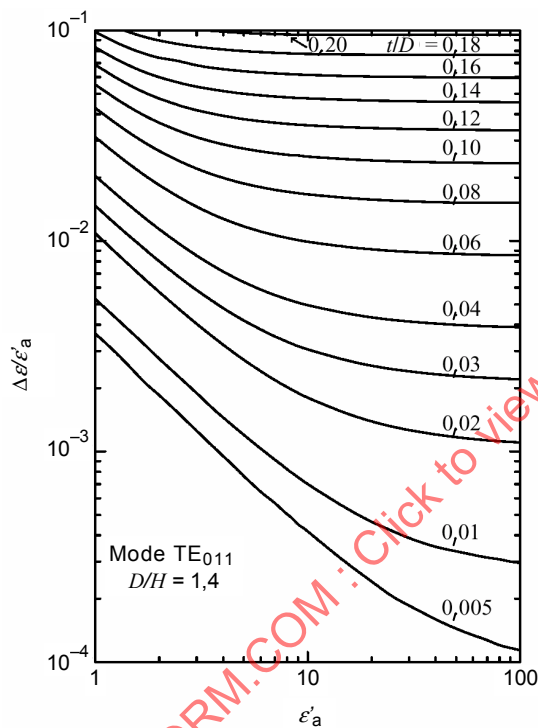


Figure 2 – Terme correctif $\Delta \varepsilon' / \varepsilon'_a$

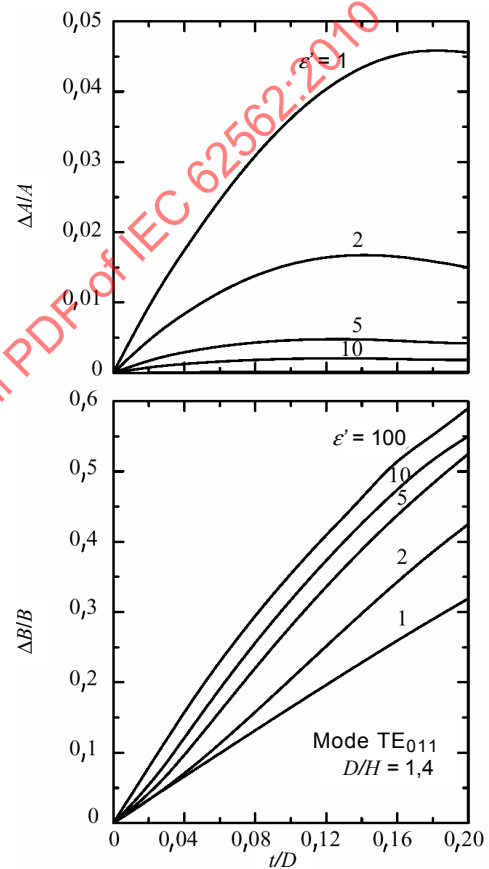


Figure 3 – Termes correctifs $\Delta A/A$ et $\Delta B/B$

3.2 Dépendance vis-à-vis de la température de ε' et $\tan \delta$

La dépendance vis-à-vis de la température de ε' et $\tan \delta$ peut également être mesurée en utilisant cette méthode. Le coefficient de température de la permittivité relative $TC\varepsilon$ est calculé par (3).

Lorsque la dépendance de ε' vis-à-vis de la température est linéaire, en particulier, $\varepsilon'(T)$ est donné par

$$\varepsilon'(T) = \varepsilon'(T_0) [1 + TC\varepsilon(T - T_0)] \quad (20)$$

où T et T_0 sont respectivement la température durant la mesure et la température de référence. Dans ce cas, on peut déterminer $TC\varepsilon$ par la méthode des moindres carrés pour un grand nombre de points de mesure en fonction de T .

Dans la mesure de $TC\varepsilon$, il convient de tenir compte du coefficient de dilatation thermique linéaire de la plaque diélectrique α et de celui de la cavité conductrice α_c . De plus, dans la mesure de la dépendance de $\tan\delta$ vis-à-vis de la température, il convient de tenir compte du coefficient de résistivité $TC\rho$. En utilisant ces paramètres, les valeurs de la dépendance de $t(T)$, $D(T)$, $H(T)$, et $\rho(T)$ vis-à-vis de la température sont données par

$$t(T) = t(T_0)[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (21)$$

$$D(T) = D(T_0)[1 + \alpha_c(T - T_0)] \quad (22)$$

$$H(T) = H(T_0)[1 + \alpha_c(T - T_0)] \quad (23)$$

$$\rho(T) = \frac{1}{\sigma(T)} = \rho(T_0)[1 + TC\rho(T - T_0)] \quad (24)$$

3.3 Paramètres de la cavité

Les paramètres de la cavité tels que D , $H = 2M$, α_c , σ_r et $TC\rho$ sont déterminés d'après les mesures des modes de résonance TE_{011} et TE_{012} d'une cavité vide sans échantillon, avant les mesures de permittivité complexe. Premièrement, on détermine D et H à partir de deux fréquences de résonance mesurées, f_1 pour le mode TE_{011} et f_2 pour le mode TE_{012} , en utilisant

$$D = \frac{cj'_{01}}{\pi} \sqrt{\frac{3}{4f_1^2 - f_2^2}} \quad (25)$$

$$H = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{3}{f_2^2 - f_1^2}} \quad (26)$$

qui peuvent facilement être déterminés d'après l'état de résonance de la cavité.

Deuxièmement, on détermine α_c d'après la mesure de la dépendance de f_1 vis-à-vis de la température, en utilisant

$$\alpha_c = -\frac{1}{f_1} \frac{\Delta f_1}{\Delta T} \quad (27)$$

Troisièmement, on détermine σ_r d'après les valeurs mesurées D , H , f_1 , Q_{uc} , qui est le facteur Q à vide pour le mode TE_{011} , au moyen de l'équation suivante.

$$\sigma_r = \frac{4\pi f_1 Q_{uc}^2 \left\{ j'_{01}{}^2 + 2\pi^2 \left(\frac{D}{2H} \right)^3 \right\}^2}{\sigma_0 \mu_0 c^2 \left\{ j'_{01}{}^2 + \left(\frac{\pi D}{2H} \right)^2 \right\}^3} \quad (28)$$

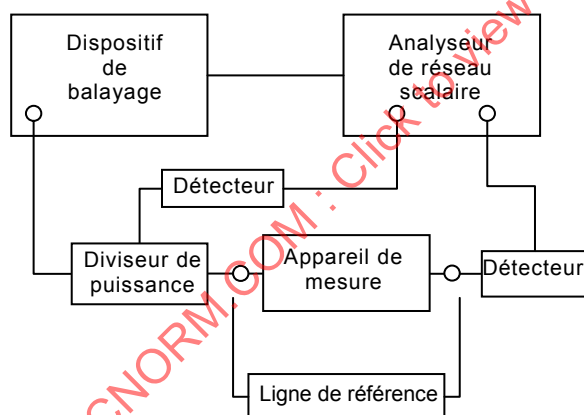
Enfin, on détermine $TC\rho$ d'après la mesure de la dépendance de $\rho_r = \sigma_0/\sigma$ vis-à-vis de la température, en utilisant

$$TC\rho = \frac{1}{\rho_r} \frac{\Delta\rho_r}{\Delta T} \quad (29)$$

4 Matériel et appareil de mesure

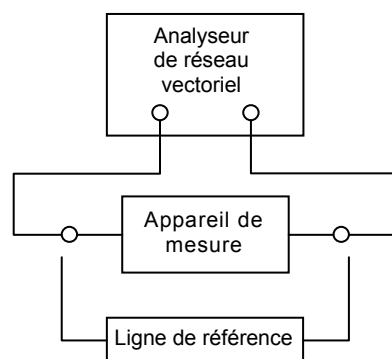
4.1 Matériel de mesure

La Figure 4 est un dessin schématique de deux systèmes de matériel requis pour une mesure en ondes millimétriques. Pour la mesure des propriétés diélectriques, seules les informations relatives à l'amplitude de la puissance transmise sont nécessaires, c'est-à-dire que les informations relatives à la phase de la puissance transmise ne sont pas requises. On peut donc utiliser un analyseur de réseau scalaire pour effectuer la mesure représentée à la Figure 4a. Toutefois, un analyseur de réseau vectoriel, représenté sur la Figure 4b, a pour avantage la précision des données de mesure.



IEC 131/10

Figure 4a – Système analyseur de réseau scalaire



IEC 132/10

Figure 4b – Système analyseur de réseau vectoriel

Figure 4 – Dessin schématique du matériel de mesure

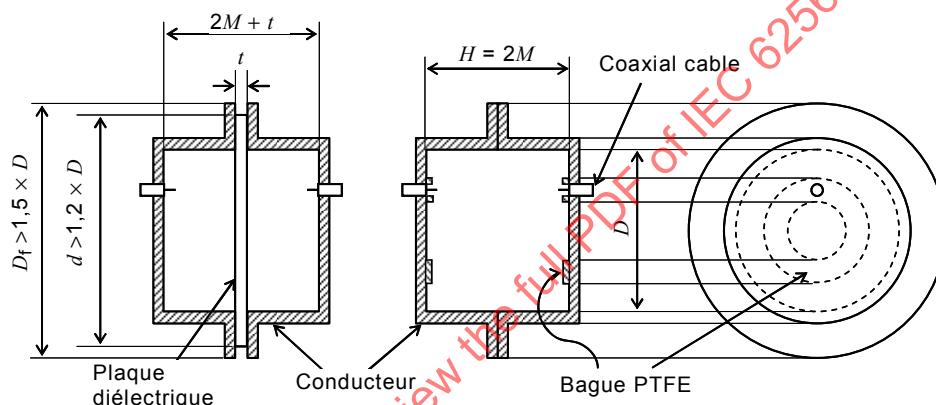
4.2 Appareil de mesure de la permittivité complexe

La structure de la cavité résonante utilisée dans la mesure de la permittivité complexe est représentée à la Figure 5. Une cavité cylindrique contenant deux parties en forme de cuvette est usinée à partir d'un bloc de cuivre. La cavité résonante a les dimensions suivantes: $D = 35$ mm, $H = 25$ mm et un diamètre de bride $D_f > 1,5$ pour une mesure à 10 GHz environ.

Un spécimen de diamètre $d > 1,2 \times D$ est placé entre les deux parties et il est serré au moyen de deux attaches destinées à fixer cette structure. La cavité résonante est excitée par les deux câbles coaxiaux semi-rigides, dont chacun comporte une petite boucle au sommet. Le résonateur de type transmission est constitué et sous-couplé de façon égale avec les boucles d'entrée et de sortie avec $S_{11} = S_{22}$. La photographie est représentée à la Figure 6.

On mesure la fréquence de résonance f_0 , la largeur de bande à demi-puissance f_{BW} , et l'affaiblissement d'insertion LA_0 (dB) à f_0 en utilisant un analyseur de réseau au moyen de la méthode du balayage de fréquence. La valeur de Q_u est donnée par

$$Q_u = \frac{Q_L}{1 - 10^{-LA_0(\text{dB})/20}}, \quad Q_L = \frac{f_0}{f_{BW}} \quad (30)$$



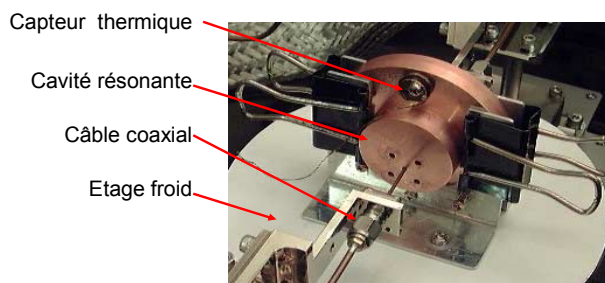
IEC 133/10

IEC 134/10

Figure 5a – Résonateur serrant un spécimen de diélectrique

Figure 5b – Cavité résonante vide

Figure 5 – Cavité résonante utilisée pour la mesure



IEC 135/10

Figure 6 – Photographie d'une cavité résonante pour des mesures à 10 GHz environ

5 Mode opératoire de mesure

5.1 Préparation de l'appareil de mesure

Mettre en place le matériel et l'appareil de mesure comme indiqué à la Figure 4. La cavité résonante et les spécimens diélectriques doivent être maintenus dans un état propre et sec,

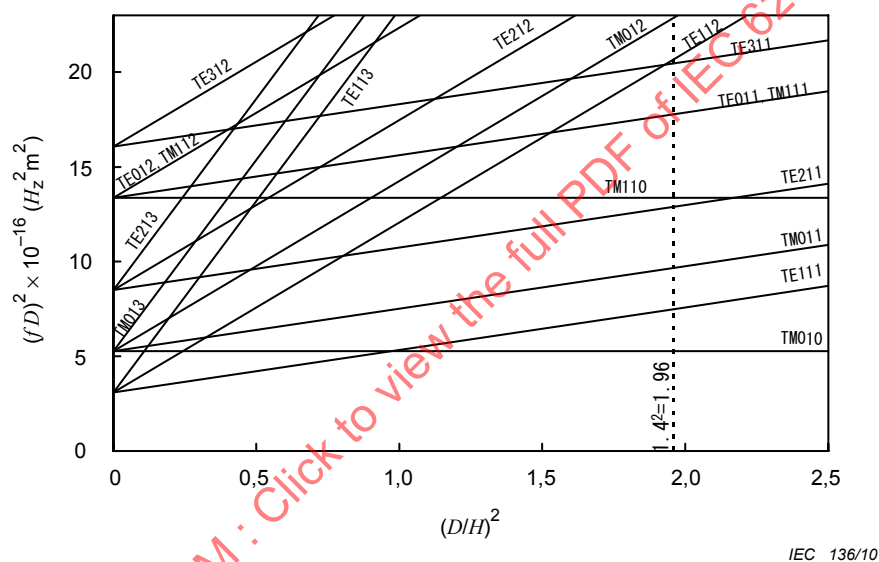
car une forte humidité dégrade le Q à vide. Il est préférable que l'humidité relative soit inférieure à 60 %.

5.2 Mesure du niveau de référence

On mesure en premier le niveau de référence, qui est le niveau de la puissance d'émission. Connecter la ligne de référence au matériel de mesure et mesurer le niveau de la puissance d'émission sur toute la plage de fréquences de mesure.

5.3 Mesure des paramètres de la cavité: D , H , σ_r , α_c , $TC\rho$

On peut estimer des valeurs grossières de f_1 du mode de résonance TE_{011} et de f_2 du mode de résonance TE_{012} d'après l'abaque de mode représenté sur la Figure 7. Les crêtes de résonance de la cavité résonante avec $D = 35$ mm et $H = 25$ mm sont représentées à la Figure 8.



IEC 136/10

Figure 7 – Abaque des modes de la cavité résonante