

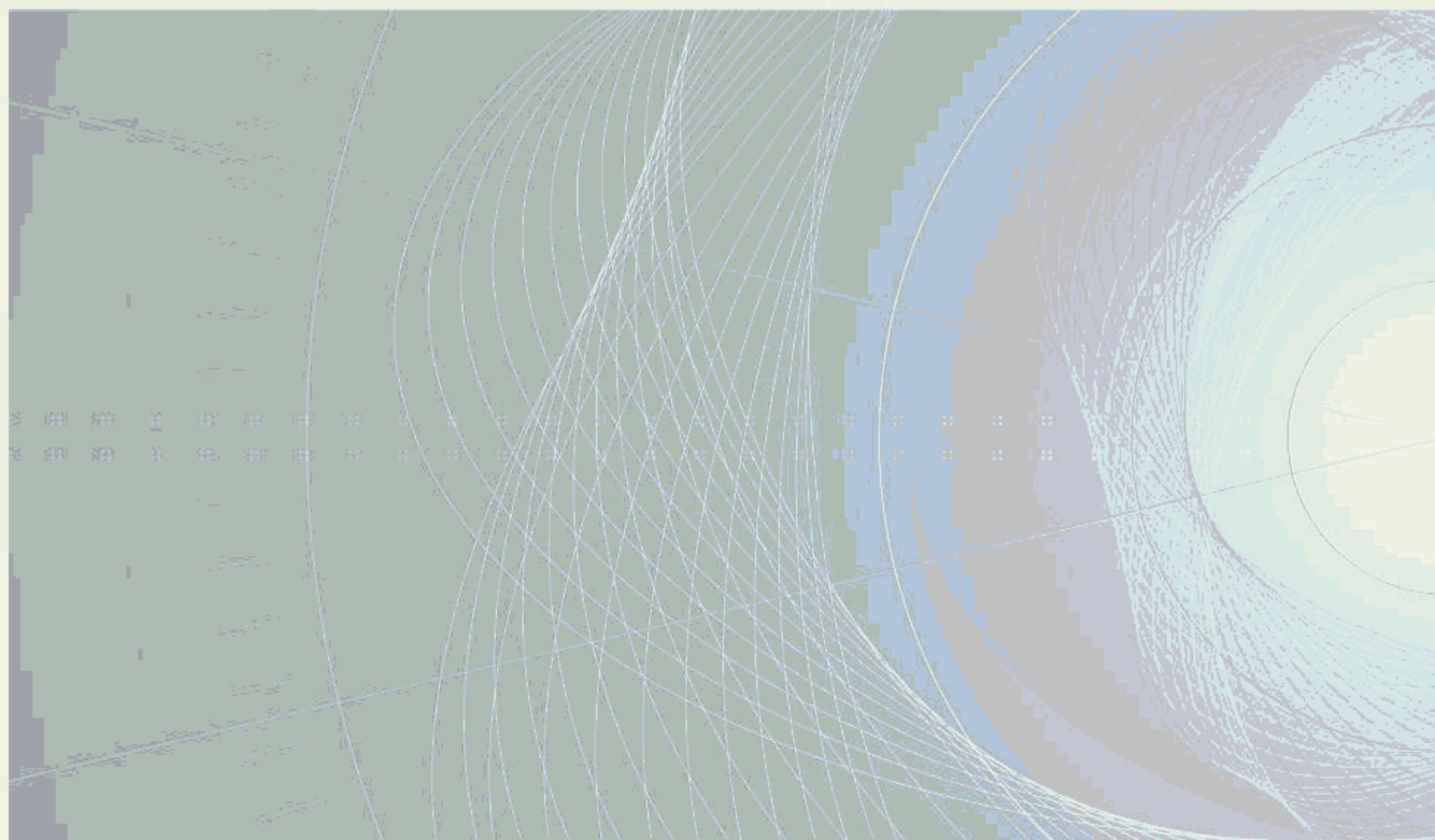
INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Measurement of the complex permittivity for low-loss dielectric substrates
balanced-type circular disk resonator method**

**Méthode au résonateur à disque circulaire de type symétrique pour mesurer la
permittivité complexe des substrats diélectriques à faible perte**





THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2020 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 Varembé
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
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 corrigendum or an amendment might have been published.

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.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 once a month by email.

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: sales@iec.ch.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 000 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

67 000 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.

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.

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

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 une fois par mois par email.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 000 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

67 000 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.



IEC 63185

Edition 1.0 2020-12

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Measurement of the complex permittivity for low-loss dielectric substrates
balanced-type circular disk resonator method**

**Méthode au résonateur à disque circulaire de type symétrique pour mesurer la
permittivité complexe des substrats diélectriques à faible perte**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 33.120.30

ISBN 978-2-8322-9133-7

**Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.**

CONTENTS

FOREWORD	3
1 Scope	5
2 Normative references	5
3 Terms and definitions	5
4 Measurement parameters	6
5 Theory and calculation equations	6
6 Measurement system	8
7 Measurement procedure	9
7.1 Preparation of measurement apparatus.....	9
7.2 Adjustment of measurement conditions	9
7.3 Calibration of a vector network analyzer	9
7.4 Measurement of complex permittivity of test sample	10
7.5 Periodic checkup of metal in resonator.....	10
Annex A (informative) Example of measurement results and associated uncertainties for complex permittivity	11
Bibliography	13
Figure 1 – Structure of a circular disk resonator	7
Figure 2 – Relations between resonant frequency and relative permittivity	8
Figure 3 – Schematic diagram of a vector network analyzer measurement system	9
Figure 4 – Frequency response of $ S_{21} $ of balanced-type circular disk resonator	10
Table A.1 – Parameters of the cavity and the sheet sample	11
Table A.2 – The resonant frequencies and unloaded Q-factors	11
Table A.3 – Measurement results of complex permittivity	12

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**MEASUREMENT OF THE COMPLEX PERMITTIVITY
FOR LOW-LOSS DIELECTRIC SUBSTRATES
BALANCED-TYPE CIRCULAR DISK RESONATOR METHOD**

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 63185 has been prepared by subcommittee 46F: RF and microwave passive components, of IEC technical committee 46: Cables, wires, waveguides, RF connectors, RF and microwave passive components and accessories.

The text of this International Standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
46F/523/FDIS	46F/531/RVD

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

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

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

MEASUREMENT OF THE COMPLEX PERMITTIVITY FOR LOW-LOSS DIELECTRIC SUBSTRATES BALANCED-TYPE CIRCULAR DISK RESONATOR METHOD

1 Scope

This document relates to a measurement method for complex permittivity of a dielectric substrates at microwave and millimeter-wave frequencies. This method has been developed to evaluate the dielectric properties of low-loss materials used in microwave and millimeter-wave circuits and devices. It uses higher-order modes of a balanced-type circular disk resonator and provides broadband measurements of dielectric substrates by using one resonator, where the effect of excitation holes is taken into account accurately on the basis of the mode-matching analysis.

In comparison with the conventional method described in IEC 62810 and IEC 61338-1-3, this method has the following characteristics:

- the values of the relative permittivity ϵ_r' and loss tangent $\tan\delta$ normal to dielectric plate samples can be measured accurately and non-destructively;
- this method presents broadband measurements by using higher-order modes by one resonator;
- this method is applicable for the measurements on the following condition:
 - frequency: $10\text{ GHz} \leq f \leq 110\text{ GHz}$;
 - relative permittivity: $1 \leq \epsilon_r' \leq 10$;
 - loss tangent: $10^{-4} \leq \tan\delta \leq 10^{-2}$.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements 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 61338-1-3:1999, *Waveguide type dielectric resonators – Part 1-3: General information and test conditions – Measurement method of complex relative permittivity for dielectric resonator materials at microwave frequency*

IEC 62810:2015, *Cylindrical cavity method to measure the complex permittivity of low-loss dielectric rods*

3 Terms and definitions

No terms and definitions are listed in this document.

ISO and IEC maintain terminological databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <http://www.iso.org/obp>

4 Measurement parameters

The measurement parameters are defined as follows:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j \varepsilon_r'' \quad (1)$$

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

where ε_r' and ε_r'' are the real and imaginary parts of the complex relative permittivity ε_r .

5 Theory and calculation equations

A resonator structure used in this method is shown in Figure 1. A thin circular conductor disk with radius R is sandwiched between a pair of dielectric plate samples to be measured having the same thickness t and dielectric properties ε_r' and $\tan \delta$. Dielectric samples are sandwiched by two parallel conductor plates. The thickness of the conductor disk is negligibly thin in the analysis.

The resonator is excited and detected by coaxial lines through excitation holes having radius a and length M . Because only the TM_{0m0} modes have the electric field in the center of the resonator, only those modes are selectively excited in the resonator, where the electric field components in the resonator are normal to the plate samples for those modes.

ε_r' and $\tan \delta$ normal to the dielectric plates are determined from the measured values of the resonant frequencies f_0 and the unloaded Q-factor Q_u for the TM_{0m0} mode by solving the following resonant condition derived from the mode-matching analysis, where the exciting holes are accurately taken into account:

$$\det H(\varepsilon_r', f_0, t, R, a, M) = 0 \quad (3)$$

$$\tan \delta = (1/Q_u - 1/Q_c)(1 + W_1/W_2) \quad (4)$$

where

H is $N \times N$ matrix derived from the boundary conditions;

N is the number of terms of the series expansions for the mode-matching analysis;

Q_c is the Q-factor due to the conductor loss;

W_1 and W_2 are the electric energies stored in the dielectric region and the excitation hole region, respectively.

W_1 and W_2 are calculated from the mode-matching analysis, and Q_c can be approximately by

$$Q_c = t/\delta_s = t(\pi f_0 \mu_0 \sigma)^{0,5} \quad (5)$$

where

δ_s is the skin depth of the conductor;

σ is the conductivity;

μ_0 is the permeability of free space.

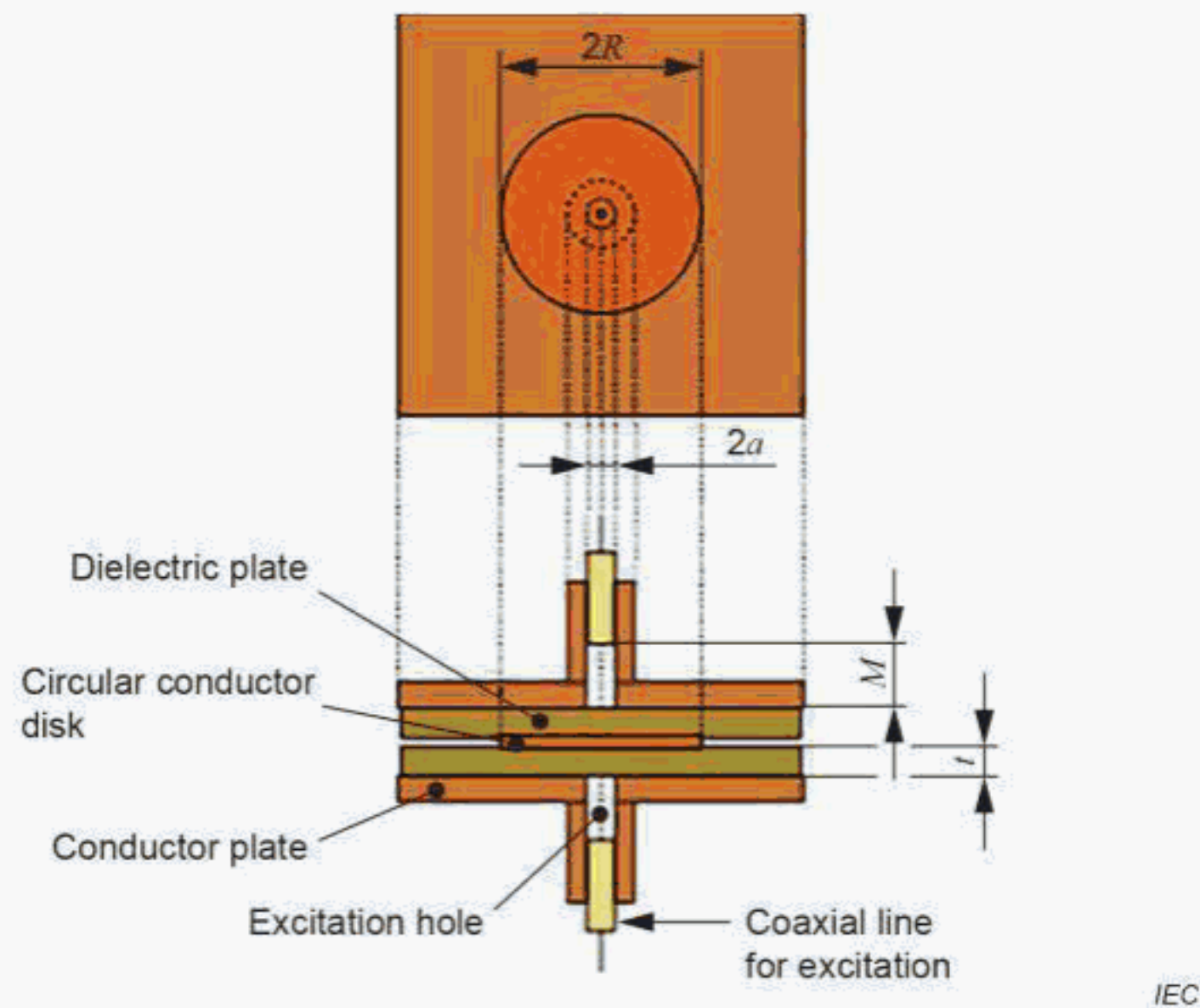


Figure 1 – Structure of a circular disk resonator

The maximum measurable frequency is limited by the following three cutoff frequencies:

- a) cutoff frequency of coaxial lines used to excite the resonator f_{cCoax} ;
- b) cutoff frequency of excitation holes f_{cHole} ;
- c) cutoff frequency for radial radiation through dielectric samples f_{cRad} .

f_{cHole} is calculated as a cutoff frequency for TM_{01} mode of a circular waveguide with radius a and is given by

$$f_{cHole} = \chi_{01}/2\pi a \quad (6)$$

where

$\chi_{01} \approx 2,4048$ is the first root of $J_0(x) = 0$;

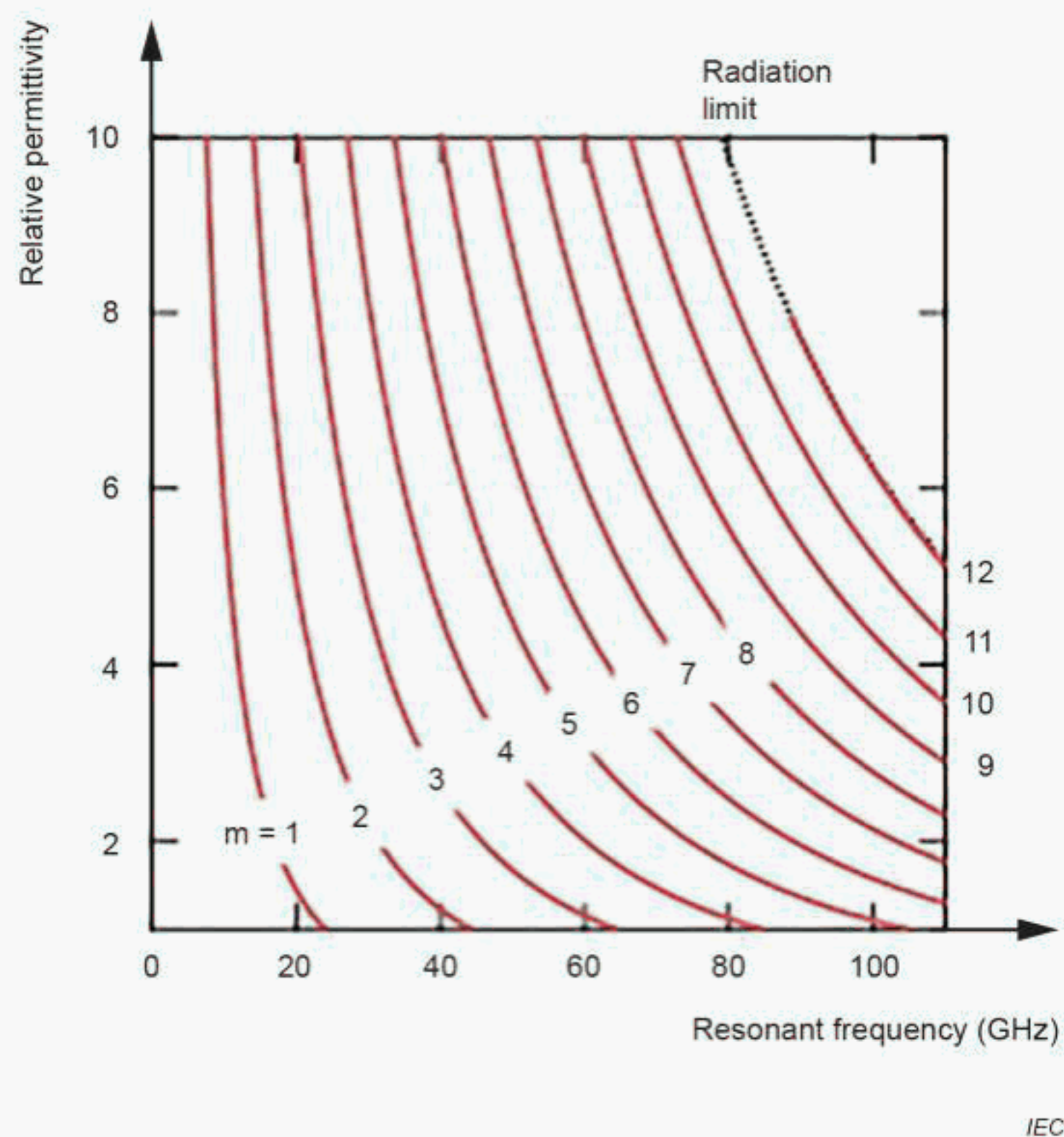
$J_0(x)$ is the Bessel function of order 0 of first kind;

c is the light velocity.

f_{cRad} is determined by the sample thickness t and relative permittivity ϵ_r' and is given by

$$f_{cRad} = c/4t(\epsilon_r')^{0,5} \quad (7)$$

Figure 2 shows the relations between f_0 and ϵ_r' for TM_{0m0} modes for $R = 7,5$ mm, $a = 0,6$ mm, $M = 5$ mm, and $t = 0,3$ mm. Multiple resonances are appeared from 5 GHz to 110 GHz for $1 \leq \epsilon_r' \leq 10$ (5 to 11 modes). Radiation limit (f_{cRad}) is also shown in the same figure.



Key

m is mode number of resonances in measurement

R 7,5 mm
 a 0,6 mm

M 5 mm
 t 0,3 mm

Figure 2 – Relations between resonant frequency and relative permittivity

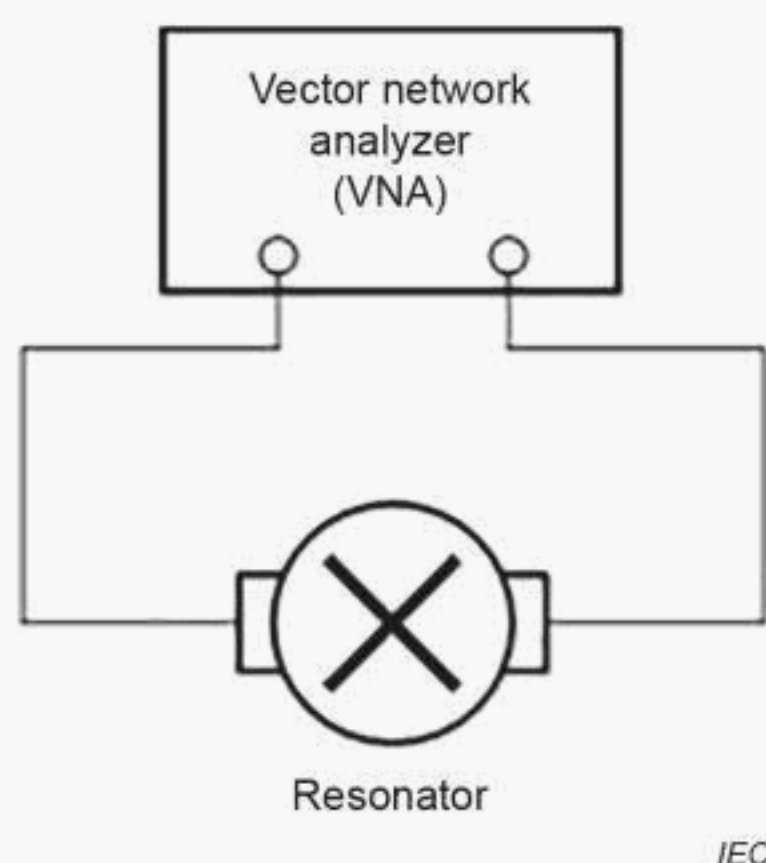
The conductivity σ is measured by the two dielectric resonator method [5] 1.

Measurement uncertainties of ϵ_r' and $\tan\delta$ are evaluated by considering the uncertainty propagations of the resonant frequency, Q-factor, dimensions of resonator and samples, and conductivity of the resonator, and by estimating the effect of the error of the mode-matching analysis [6].

6 Measurement system

Figure 3 shows a schematic diagram of a vector network analyzer measurement system for a transmission-type resonator. A scalar network analyzer can also be used for measuring equipment, because resonant frequencies and Q-factors can be derived from the frequency dependence of the amplitude of the transmission, S_{21} . However, a vector network analyzer has an advantage in precision of the measurement. Furthermore, resonant frequencies and Q-factors are more accurate and less susceptible when they are derived from complex values of measured S_{21} data by using the circle fitting on the complex plane of S_{21} [7].

¹ Figures in square brackets refer to the bibliography.



IEC

Figure 3 – Schematic diagram of a vector network analyzer measurement system

The structure of the resonator used in the complex permittivity measurements is shown in Figure 1. A pair of dielectric plate samples to be measured, thin circular conductor disk, and two parallel conductor plates constitutes a balanced-type circular disk resonator. The resonator is excited by coaxial lines through excitation holes and under-coupled equally to the input and output ports.

The resonant frequency f_0 and the loaded Q-factor Q_l are derived from the frequency dependence of S_{21} that is measured by using a vector network analyzer [7]. The unloaded Q-factor Q_u is given by

$$Q_u = Q_l / (1 - 10^{-LA_0(\text{dB})/20}) \quad (8)$$

Where $LA_0(\text{dB})$ is the insertion attenuation at f_0 .

The coupling factor of electromagnetic wave signals shall be the same at input and output ports.

7 Measurement procedure

7.1 Preparation of measurement apparatus

Set up the measurement equipment and apparatus as shown in Figure 3. The cavity resonator and dielectric samples shall be kept in a clean and dry state, as high humidity degrades unloaded Q-factors.

7.2 Adjustment of measurement conditions

Set up the measurement conditions of a vector network analyzer. The interval between discrete frequency points shall preferably be less than one tenth of the half width of the resonant waveform. Intermediate frequency band width (IFBW), like as digital band pass filter condition in vector network analyzer, is determined such that the noise floor is at least 20 dB lower than the peak values.

7.3 Calibration of a vector network analyzer

A vector network analyzer shall be calibrated by using calibration kits.

7.4 Measurement of complex permittivity of test sample

Constitute a balanced-type circular disk resonator by the pair of test samples. Figure 4 shows the frequency dependence of $|S_{21}|$. Resonant frequencies of TM_{010} to TM_{050} modes are indicated by the downward arrows. Measure the resonant frequency and unloaded Q-factor of each mode and calculate the complex permittivity at each resonant frequency of test samples by using Equations (3) and (4).

The alignment between the conductor disk and excitation holes is critical to measurement results, but it is possible to find a misalignment by detecting resonances of unwanted modes between adjacent TM_{0m0} modes. In the frequency response of $|S_{21}|$, resonant peaks for unwanted modes shall be at least 15 dB lower than those for adjacent TM_{0m0} modes.

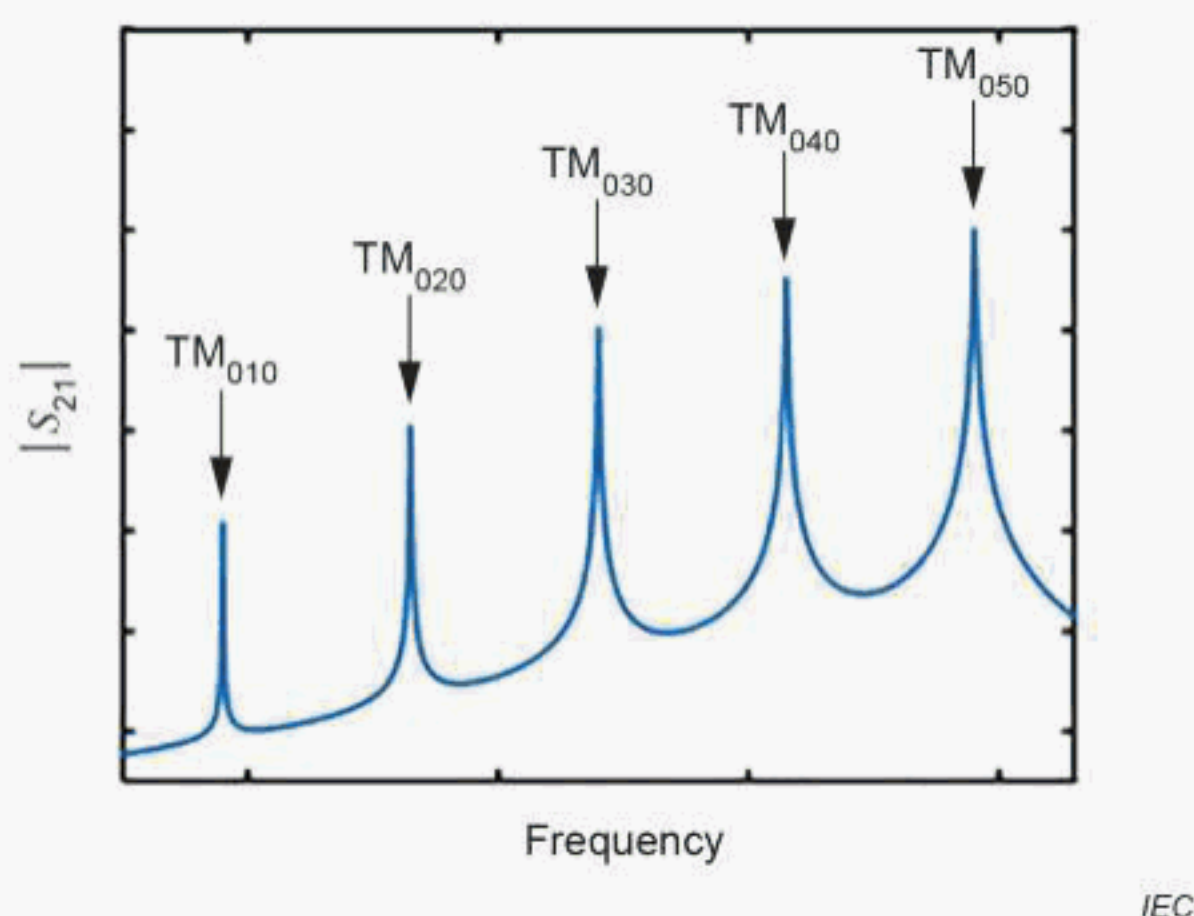


Figure 4 – Frequency response of $|S_{21}|$ of balanced-type circular disk resonator

7.5 Periodic checkup of metal in resonator

Since the conductivity of the conductor plates and circular disk degrades due to oxidation of the metals and scratches on the surfaces, the quality of the metals of the resonator shall be checked periodically. It can be checked by measuring the conductivity by using the two dielectric resonator method [5]. Instead, it can be checked by measuring the same low-loss sample periodically. By checking the reproducibility of the measurement results of loss tangent of the specified verification sample, it is possible to find the surface characteristic change in the metals of the resonator.

Annex A (informative)

Example of measurement results and associated uncertainties for complex permittivity

The measurement results and associated uncertainties for the complex permittivity of cyclic olefin polymer (COP) sheet sample are obtained as followed. Hereafter, measurement uncertainty of each quantity is expressed by its expanded uncertainty with a coverage factor of $k = 2$.

- a) The parameters such as R , a , and M of the cavity and t of the COP sample used in the measurements are shown in Table A.1.

Table A.1 – Parameters of the cavity and the sheet sample

R (mm)	a (mm)	M (mm)	t (mm)
7,482 5	0,60 ± 0,03	5,00 ± 0,25	0,376 ± 0,001

- b) The resonant frequency f_0 and unloaded Q-factor Q_u of the TM₀₁₀ to TM₀₈₀ modes in the cavity with the COP sample are measured and shown in Table A.2. Uncertainty evaluations of the resonant frequency and Q-factor are performed by considering the uncertainty propagation of the uncertainty of S_{21} , measurement repeatability, and the effect of frequency resolution determined by the interval between discrete frequency points. Monte-Carlo calculations are performed to evaluate the uncertainties of these resonant properties [7].

Table A.2 – The resonant frequencies and unloaded Q-factors

Mode	f_0 (GHz)	Q_u
TM ₀₁₀	15,716 62 ± 0,000 70	602 ± 36
TM ₀₂₀	28,915 72 ± 0,000 78	707 ± 32
TM ₀₃₀	42,077 54 ± 0,000 82	793 ± 32
TM ₀₄₀	55,234 90 ± 0,000 88	860 ± 30
TM ₀₅₀	68,364 ± 0,012	910 ± 190
TM ₀₆₀	81,430 ± 0,012	930 ± 180
TM ₀₇₀	94,397 ± 0,012	940 ± 160
TM ₀₈₀	107,185 ± 0,012	910 ± 140

- c) To express the leakage field through sample in a radial direction (fringing field), the effective radius $R + \Delta R$ is introduced in the analysis where the cylindrical magnetic wall is assumed [1]. When t is much smaller than a wavelength, ΔR is approximated by $(2\ln 2 / \pi)d$ [5]. Because the introduction of the effective radius is the approximate analytical method for compensating the fringing field, the uncertainty of R is conservatively estimated: $u(R) = \Delta R / \sqrt{3}$, by assuming that the radius follows a uniform distribution ranging from R to $R + 2\Delta R$.
- d) The conductivity of the metal of the resonator is measured by the two dielectric resonator method at 10 GHz, and the result is $\sigma = 5,63 \pm 0,18 \times 10^{-7}$ S/m.

- e) The measurement results of the complex permittivity of the COP sample are calculated by deriving Equations (3) and (4). Associated uncertainties are evaluated by considering the uncertainty propagations of f_0 , Q_u , t , R , a , M and σ . The effect of the finiteness of the number of terms used in the mode-matching analysis (relative convergence error) is also considered in the uncertainty evaluation [8] of the complex permittivity. The results are shown in Table A.3.

Table A.3 – Measurement results of complex permittivity

Mode	ϵ_r'	$\tan\delta$ (10 ⁻⁴)
TM ₀₁₀	2,35 ± 0,12	2,39 ± 0,68
TM ₀₂₀	2,35 ± 0,12	3,66 ± 0,47
TM ₀₃₀	2,35 ± 0,12	3,92 ± 0,38
TM ₀₄₀	2,35 ± 0,12	4,03 ± 0,32
TM ₀₅₀	2,35 ± 0,13	4,2 ± 1,2
TM ₀₆₀	2,36 ± 0,13	4,5 ± 1,0
TM ₀₇₀	2,37 ± 0,13	4,87 ± 0,93
TM ₀₈₀	2,38 ± 0,13	5,55 ± 0,86

Bibliography

- [1] KAWABATA, H HASUIKE, K.I., KOBAYASHI, Y and MA, Z, "Multi-Frequency Measurements of Complex Permittivity of Dielectric Plates using Higher-Order Modes of a Balanced-Type Circular Disk Resonator," European Microwave Conference, Manchester, 2006, pp. 388-391
 - [2] NAKATSUTSUMI, J, KOBAYASHI, Y and MA, Z. W., "Discussions on measurement accuracy of complex relative permittivity using a balanced-type circular disk resonator method," 2014 Asia-Pacific Microwave Conference, Sendai, Japan, 2014, pp. 522-524
 - [3] TANABE, K, KOBAYASHI, Y and TANAKA, S, "Numerical Analysis of Eigenvalue Solution of Disk Resonator (Short Papers)," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 23, no. 6, pp. 508-511, Jun 1975
 - [4] KAWABATA, H, and KOBAYASHI, Y, "The analysis of a balanced-type circular disk resonator excited by coaxial cable lines to measure the complex permittivity," in Proc. Asia-Pacific Microw. Conf., 2001, pp. 1322–1325
 - [5] MARCUVITZ, N, Waveguide Handbook. New York: McGraw-Hill, 1951
 - [6] KATO, Y and HORIBE, M, "Permittivity measurements and associated uncertainties up to 110 GHz in circular-disk resonator method," 2016 46th European Microwave Conference (EuMC), London, 2016, pp. 1139-1142
 - [7] KATO, Y and HORIBE, M, "Comparison of calculation techniques for Q-factor determination of resonant structures based on influence of VNA measurement uncertainty," IEICE Trans. Electron., vol. E97-C, no. 6, pp. 575–582, Jun 2014
 - [8] ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	15
1 Domaine d'application	17
2 Références normatives	17
3 Termes et définitions	17
4 Paramètres de mesure	18
5 Théorie et équations de calcul	18
6 Système de mesure	20
7 Procédure de mesure	21
7.1 Préparation de l'appareil de mesure	21
7.2 Réglage des conditions de mesure	21
7.3 Étalonnage d'un analyseur de réseau vectoriel	21
7.4 Mesurage de la permittivité complexe de l'échantillon d'essai	22
7.5 Vérification périodique du métal dans le résonateur	22
Annexe A (informative) Exemple de résultats de mesure de la permittivité complexe et incertitudes associées	23
Bibliographie	25
Figure 1 – Structure d'un résonateur à disque circulaire	19
Figure 2 – Relations entre la fréquence de résonance et la permittivité relative	20
Figure 3 – Schéma de principe d'un système de mesure d'un analyseur de réseau vectoriel	21
Figure 4 – Réponse en fréquence de $ S_{21} $ du résonateur à disque circulaire de type symétrique	22
Tableau A.1 – Paramètres de la cavité et échantillon de tôle	23
Tableau A.2 – Fréquences de résonance et facteurs de qualité Q sans charge	23
Tableau A.3 – Résultats de mesure de la permittivité complexe	24

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MÉTHODE AU RÉSONATEUR À DISQUE CIRCULAIRE DE TYPE SYMÉTRIQUE POUR MESURER LA PERMITTIVITÉ COMPLEXE DES SUBSTRATS DIÉLECTRIQUES À FAIBLE PERTE

AVANT-PROPOS

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

La Norme internationale IEC 63185 a été établie par le sous-comité 46F: Composants passifs pour hyperfréquences et radio fréquences, du comité d'études 46 de l'IEC: Câbles, fils, guides d'ondes, connecteurs, composants passifs pour micro-onde et accessoires.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
46F/523/FDIS	46F/531/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette Norme internationale.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous «<http://webstore.iec.ch>» dans les données relatives au document recherché. À cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

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 ce document en utilisant une imprimante couleur.

MÉTHODE AU RÉSONATEUR À DISQUE CIRCULAIRE DE TYPE SYMÉTRIQUE POUR MESURER LA PERMITTIVITÉ COMPLEXE DES SUBSTRATS DIÉLECTRIQUES À FAIBLE PERTE

1 Domaine d'application

Le présent document traite d'une méthode de mesure de la permittivité complexe des substrats diélectriques aux hyperfréquences et aux fréquences à ondes millimétriques. Cette méthode a été élaborée pour évaluer les propriétés diélectriques des matériaux à faible perte utilisés dans les circuits et dispositifs hyperfréquences et à ondes millimétriques. Cette méthode utilise des modes d'ordre supérieur d'un résonateur à disque circulaire de type symétrique et permet d'effectuer, à l'aide d'un résonateur, des mesurages à large bande de substrats diélectriques, dont l'effet des trous d'excitation est pris en compte avec exactitude sur la base de l'analyse de couplage de mode.

En comparaison avec la méthode conventionnelle décrite dans l'IEC 62810 et l'IEC 61338-1-3, cette méthode présente les caractéristiques suivantes:

- elle permet de mesurer avec exactitude et de manière non destructive les valeurs de la permittivité relative ϵ_r' et de la tangente de l'angle de pertes $\tan\delta$ perpendiculaire aux échantillons de plaques diélectriques;
- elle permet des mesurages à large bande à l'aide de modes d'ordre supérieur d'un résonateur;
- elle est applicable pour effectuer des mesurages dans les conditions suivantes:
 - fréquence: $10 \text{ GHz} \leq f \leq 110 \text{ GHz}$;
 - permittivité relative: $1 \leq \epsilon_r' \leq 10$;
 - tangente de l'angle de pertes: $10^{-4} \leq \tan\delta \leq 10^{-2}$.

2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences 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).

IEC 61338-1-3:1999, *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*

IEC 62810:2015, *Cylindrical cavity method to measure the complex permittivity of low-loss dielectric rods* (disponible en anglais seulement)

3 Termes et définitions

Aucun terme n'est défini dans le présent document.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

4 Paramètres de mesure

Les paramètres de mesure sont définis comme suit:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j \varepsilon_r'' \quad (1)$$

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

où ε_r' et ε_r'' sont les parties réelle et imaginaire de la permittivité relative complexe ε_r .

5 Théorie et équations de calcul

La Figure 1 représente la structure d'un résonateur utilisé dans cette méthode. Un disque conducteur circulaire mince de rayon R est pris en sandwich entre une paire d'échantillons de plaques diélectriques à mesurer et ayant la même épaisseur t et des propriétés diélectriques ε_r' et $\tan \delta$. Les échantillons diélectriques sont pris en sandwich entre deux plaques conductrices parallèles. L'épaisseur du disque conducteur est négligeable dans l'analyse.

Le résonateur est excité et détecté par des lignes coaxiales passant par des trous d'excitation de rayon a et de longueur M . Étant donné que seuls les modes TM_{0m0} ont le champ électrique au centre du résonateur, seuls ces modes sont excités sélectivement dans le résonateur dont les composantes du champ électrique sont perpendiculaires aux échantillons de plaques destinés à ces modes.

Les propriétés diélectriques ε_r' et $\tan \delta$ perpendiculaires aux plaques diélectriques sont calculées à partir des valeurs mesurées des fréquences de résonance f_0 et du facteur de qualité Q sans charge Q_u du mode TM_{0m0} . Ce calcul s'effectue en satisfaisant aux conditions de résonance suivantes dérivées de l'analyse de couplage de mode qui prend en compte avec exactitude les trous d'excitation:

$$\det H(\varepsilon_r', f_0, t, R, a, M) = 0 \quad (3)$$

$$\tan \delta = (1/Q_u - 1/Q_c)(1 + W_1/W_2) \quad (4)$$

où

H est la matrice $N \times N$ dérivée des conditions aux limites;

N est le nombre de termes des développements en série pour l'analyse de couplage de mode;

Q_c est le facteur de qualité Q dû aux pertes du conducteur;

W_1 et W_2 sont l'énergie électrique stockée dans la région diélectrique et la région du trou d'excitation, respectivement.

W_1 et W_2 sont calculées à partir de l'analyse de couplage de mode, et Q_c peut être déterminé approximativement par la formule

$$Q_c = t/\delta_s = t(\pi f_0 \mu_0 \sigma)^{0,5} \quad (5)$$

où

δ_s est l'épaisseur de peau du conducteur;

σ est la conductivité;

μ_0 est la perméabilité de l'espace libre.

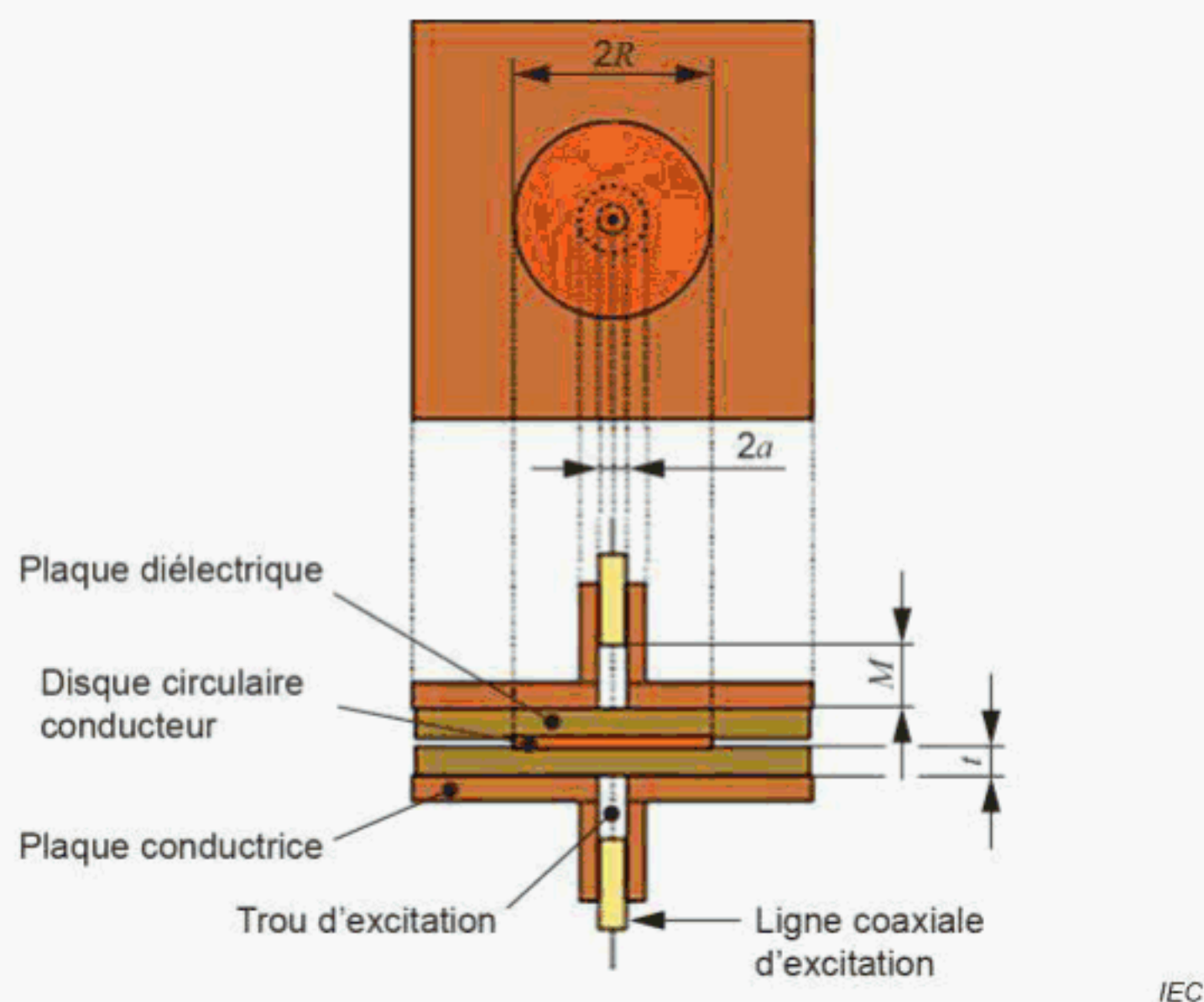


Figure 1 – Structure d'un résonateur à disque circulaire

La fréquence maximale mesurable est limitée par les trois fréquences de coupure suivantes:

- a) fréquence de coupure des lignes coaxiales utilisées pour exciter le résonateur f_{cCoax} ;
- b) fréquence de coupure des trous d'excitation f_{cHole} ;
- c) fréquence de coupure du rayonnement radial à travers les échantillons diélectriques f_{cRad} .

f_{cHole} est calculée comme une fréquence de coupure du mode TM_{01} d'un guide d'ondes circulaire de rayon a et est donnée par

$$f_{cHole} = \chi_{01}/2\pi a \quad (6)$$

où

$\chi_{01} \approx 2,4048$ est la première racine de $J_0(x) = 0$;

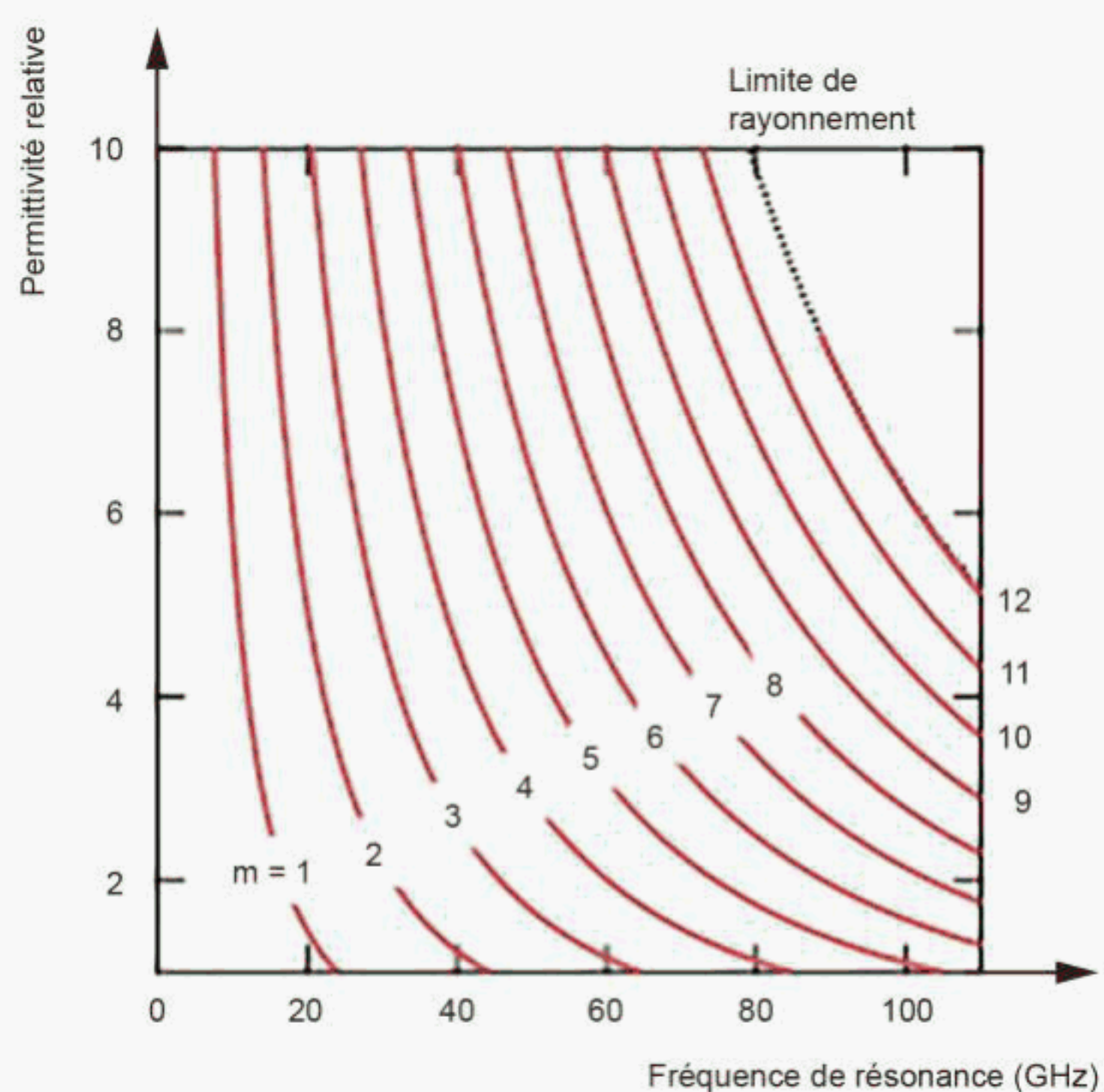
$J_0(x)$ est la fonction de Bessel d'ordre 0 de premier type;

c est la vitesse de la lumière.

f_{cRad} est déterminée par l'épaisseur de l'échantillon t et la permittivité relative ϵ_r' et est donnée par

$$f_{cRad} = c/4t(\epsilon_r')^{0,5} \quad (7)$$

La Figure 2 représente les relations entre f_0 et ϵ_r' des modes TM_{0m0} $R = 7,5$ mm, $a = 0,6$ mm, $M = 5$ mm, et $t = 0,3$ mm. Des résonances multiples sont survenues entre 5 GHz et 110 GHz pour $1 \leq \epsilon_r' \leq 10$ (5 à 11 modes). La limite de rayonnement (f_{cRad}) est aussi représentée à la même figure.



IEC

Légende

m est le numéro de mode des résonances dans le mesurage

R 7,5 mm
 a 0,6 mm

M 5 mm
 t 0,3 mm

Figure 2 – Relations entre la fréquence de résonance et la permittivité relative

La conductivité σ est mesurée par la méthode à deux résonateurs diélectriques [5] 1.

Les incertitudes de mesure de ϵ_r' et de $\tan\delta$ sont évaluées en prenant en considération les propagations d'incertitude de la fréquence de résonance, le facteur de qualité Q, les dimensions du résonateur et des échantillons ainsi que la conductivité du résonateur, et en estimant l'effet de l'erreur de l'analyse de couplage de mode [6].

6 Système de mesure

La Figure 3 représente le schéma de principe d'un système de mesure d'un analyseur de réseau vectoriel pour un résonateur du type à transmission. Un analyseur de réseau scalaire peut également être utilisé pour les appareils de mesure, car les fréquences de résonance et les facteurs de qualité Q peuvent être dérivés de la dépendance en fréquence de l'amplitude de la transmission, S_{21} . Cependant, un analyseur de réseau vectoriel présente un avantage en matière de précision de mesure. En outre, les fréquences de résonance et les facteurs de qualité Q sont plus exacts et moins sensibles lorsqu'ils sont dérivés des valeurs complexes des données S_{21} mesurées en utilisant le cercle ajusté sur le plan complexe de S_{21} [7].

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie.

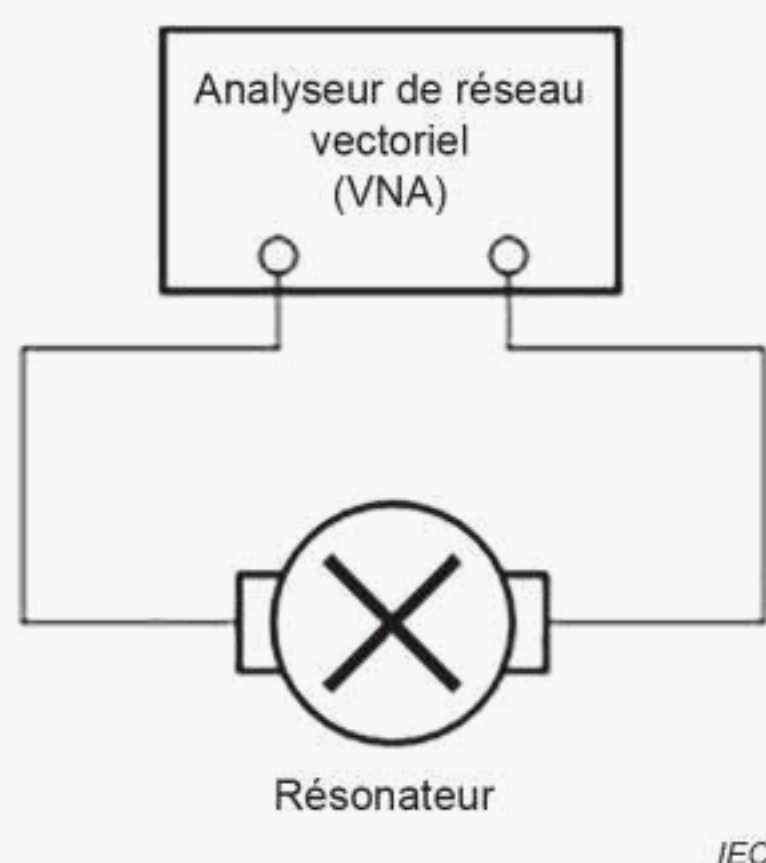


Figure 3 – Schéma de principe d'un système de mesure d'un analyseur de réseau vectoriel

La structure du résonateur utilisé lors des mesurages de la permittivité complexe est représentée à la Figure 1. Un résonateur à disque circulaire de type symétrique est constitué d'une paire d'échantillons de plaques diélectriques à mesurer, d'un disque conducteur circulaire mince et de deux plaques conductrices parallèles. Le résonateur est excité par des lignes coaxiales passant par des trous d'excitation et est sous-couplé de manière égale aux accès d'entrée et de sortie.

La fréquence de résonance f_0 et le facteur de qualité Q avec charge Q_l sont dérivés de la dépendance en fréquence de S_{21} mesurée à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel [7]. Le facteur de qualité Q sans charge Q_u est donné par

$$Q_u = Q_l / (1 - 10^{-LA_0(\text{dB})/20}) \quad (8)$$

où $LA_0(\text{dB})$ est l'affaiblissement d'insertion à la fréquence de résonance f_0 .

Le facteur de couplage des signaux d'onde électromagnétique doit être le même aux accès d'entrée et de sortie.

7 Procédure de mesure

7.1 Préparation de l'appareil de mesure

Configurer les instruments et appareils de mesure comme cela est représenté à la Figure 3. La cavité résonante et les échantillons diélectriques doivent être maintenus dans un état propre et sec, car une humidité élevée dégrade les facteurs de qualité Q sans charge.

7.2 Réglage des conditions de mesure

Configurer les conditions de mesure d'un analyseur de réseau vectoriel. L'intervalle entre les points de fréquence discrète doit de préférence être inférieur au dixième de la demi-largeur de la forme d'onde de résonance. La largeur de bande de la fréquence intermédiaire (IFBW – *intermediate frequency band width*) telle que la condition de filtre passe-bande numérique dans l'analyseur de réseau vectoriel, est déterminée de telle sorte que le bruit de fond soit inférieur d'au moins 20 dB aux valeurs de crête.

7.3 Étalonnage d'un analyseur de réseau vectoriel

Un analyseur de réseau vectoriel doit être étalonné à l'aide de kits d'étalonnage.

7.4 Mesurage de la permittivité complexe de l'échantillon d'essai

Constituer un résonateur à disque circulaire de type symétrique avec la paire d'échantillons d'essai. La Figure 4 représente la dépendance en fréquence de $|S_{21}|$. Les fréquences de résonance des modes TM_{010} à TM_{050} sont indiquées par les flèches descendantes. Mesurer la fréquence de résonance et le facteur de qualité Q sans charge de chaque mode et calculer la permittivité complexe à chaque fréquence de résonance des échantillons d'essai à l'aide des Équations (3) et (4).

L'alignement entre le disque conducteur et les trous d'excitation est essentiel pour les résultats de mesure. Il est toutefois possible d'identifier un désalignement en détectant les résonances des modes non désirés entre les modes TM_{0m0} adjacents. Dans la réponse en fréquence de $|S_{21}|$, les pics de résonance des modes non désirés doivent être inférieurs d'au moins 15 dB à ceux des modes TM_{0m0} adjacents.

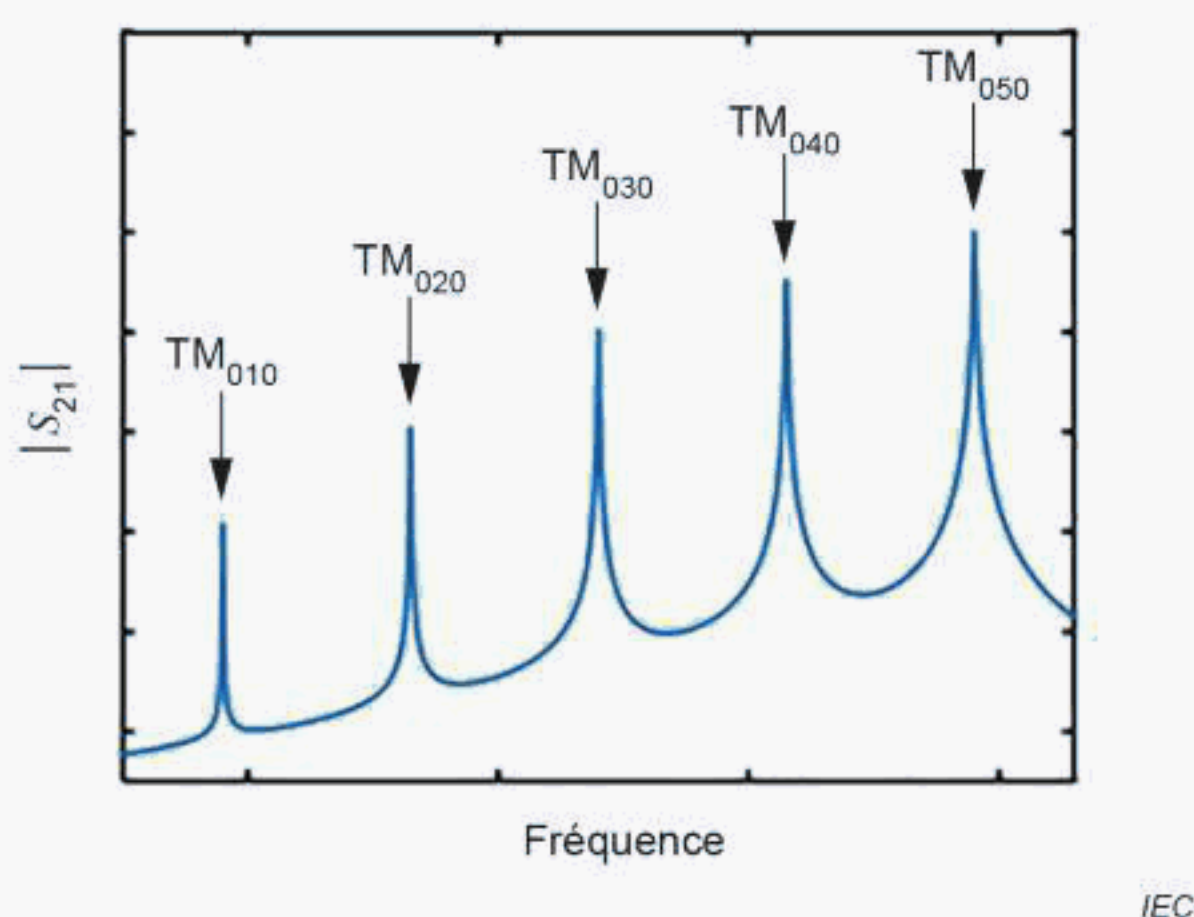


Figure 4 – Réponse en fréquence de $|S_{21}|$ du résonateur à disque circulaire de type symétrique

7.5 Vérification périodique du métal dans le résonateur

La conductivité des plaques conductrices et du disque circulaire se dégradant du fait de l'oxydation des métaux et des rayures sur les surfaces, la qualité des métaux du résonateur doit être régulièrement vérifiée. Elle peut être vérifiée en mesurant la conductivité à l'aide de la méthode à deux résonateurs diélectriques [5]. En variante, elle peut être vérifiée en mesurant régulièrement le même échantillon à faibles pertes. Il est possible d'identifier la variation des caractéristiques de la surface des métaux du résonateur en vérifiant la reproductibilité des résultats de mesure de la tangente de l'angle de pertes de l'échantillon de vérification spécifié.

Annexe A (informative)

Exemple de résultats de mesure de la permittivité complexe et incertitudes associées

Les résultats de mesure et les incertitudes qui leur sont associées en ce qui concerne la permittivité complexe d'un échantillon de tôle de polymère d'oléfine cyclique (COP – *cyclic olefin polymer*) sont obtenus comme cela est décrit ci-dessous. L'incertitude de mesure de chaque grandeur est ci-après exprimée par son incertitude élargie avec un facteur d'élargissement de $k = 2$.

- a) Les paramètres tels que R , a et M de la cavité et t de l'échantillon de COP utilisés dans les mesurages sont présentés dans le Tableau A.1.

Tableau A.1 – Paramètres de la cavité et échantillon de tôle

R (mm)	a (mm)	M (mm)	t (mm)
7,482 5	0,60 ± 0,03	5,00 ± 0,25	0,376 ± 0,001

- b) La fréquence de résonance f_0 et le facteur de qualité Q sans charge Q_u des modes TM_{010} à TM_{080} de la cavité contenant l'échantillon de COP sont mesurés et présentés dans le Tableau A.2. Les évaluations de l'incertitude de la fréquence de résonance et du facteur de qualité Q sont effectuées en prenant en considération la propagation d'incertitude de l'incertitude de S_{21} , la répétabilité de mesure et l'effet de la résolution en fréquence déterminé par l'intervalle entre les points de fréquence discrète. Des calculs Monte-Carlo sont effectués pour évaluer les incertitudes de ces propriétés de résonance [7].

Tableau A.2 – Fréquences de résonance et facteurs de qualité Q sans charge

Mode	f_0 (GHz)	Q_u
TM ₀₁₀	15,716 62 ± 0,000 70	602 ± 36
TM ₀₂₀	28,915 72 ± 0,000 78	707 ± 32
TM ₀₃₀	42,077 54 ± 0,000 82	793 ± 32
TM ₀₄₀	55,234 90 ± 0,000 88	860 ± 30
TM ₀₅₀	68,364 ± 0,012	910 ± 190
TM ₀₆₀	81,430 ± 0,012	930 ± 180
TM ₀₇₀	94,397 ± 0,012	940 ± 160
TM ₀₈₀	107,185 ± 0,012	910 ± 140

- c) Pour exprimer le champ de fuite à travers l'échantillon dans une direction radiale (champ de frange), le rayon efficace $R + \Delta R$ est introduit dans l'analyse en retenant pour hypothèse la paroi magnétique cylindrique [1]. Lorsque la valeur de ΔR est beaucoup plus petite qu'une longueur d'onde, ΔR est approchée par $2\ln(2/\pi)d$ [5]. Dans la mesure où l'introduction du rayon efficace constitue la méthode analytique approximative de compensation du champ de frange, l'incertitude de R est estimée de manière prudente: $u(R) = \Delta R / \sqrt{3}$, en partant du principe que le rayon suit une loi uniforme allant de R à $R + 2\Delta R$.
- d) La conductivité du métal du résonateur est mesurée à l'aide de la méthode à deux résonateurs diélectriques à 10 GHz et le résultat est $\sigma = 5,63 \pm 0,18 \times 10^{-7}$ S/m.

- e) Les résultats de mesure de la permittivité complexe de l'échantillon de COP sont calculés à l'aide des Équations (3) et (4). Les incertitudes associées sont évaluées en prenant en considération les propagations d'incertitude de f_0 , Q_u , t , R , a , M et σ . L'effet du caractère fini du nombre de termes utilisés dans l'analyse de couplage de mode (erreur de convergence relative) est également pris en considération dans l'évaluation de l'incertitude [8] de la permittivité complexe. Les résultats sont présentés dans le Tableau A.3.

Tableau A.3 – Résultats de mesure de la permittivité complexe

Mode	ε_r'	$\tan\delta$ (10 ⁻⁴)
TM ₀₁₀	2,35 ± 0,12	2,39 ± 0,68
TM ₀₂₀	2,35 ± 0,12	3,66 ± 0,47
TM ₀₃₀	2,35 ± 0,12	3,92 ± 0,38
TM ₀₄₀	2,35 ± 0,12	4,03 ± 0,32
TM ₀₅₀	2,35 ± 0,13	4,2 ± 1,2
TM ₀₆₀	2,36 ± 0,13	4,5 ± 1,0
TM ₀₇₀	2,37 ± 0,13	4,87 ± 0,93
TM ₀₈₀	2,38 ± 0,13	5,55 ± 0,86

Bibliographie

- [1] KAWABATA, H HASUIKE, K.I., KOBAYASHI, Y and MA, Z, "Multi-Frequency Measurements of Complex Permittivity of Dielectric Plates using Higher-Order Modes of a Balanced-Type Circular Disk Resonator," European Microwave Conference, Manchester, 2006, pp. 388-391
 - [2] NAKATSUTSUMI, J, KOBAYASHI, Y and MA, Z. W., "Discussions on measurement accuracy of complex relative permittivity using a balanced-type circular disk resonator method," 2014 Asia-Pacific Microwave Conference, Sendai, Japan, 2014, pp. 522-524
 - [3] TANABE, K, KOBAYASHI, Y and TANAKA, S, "Numerical Analysis of Eigenvalue Solution of Disk Resonator (Short Papers)," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 23, no. 6, pp. 508-511, Jun 1975
 - [4] KAWABATA, H, and KOBAYASHI, Y, "The analysis of a balanced-type circular disk resonator excited by coaxial cable lines to measure the complex permittivity," in Proc. Asia-Pacific Microw. Conf., 2001, pp. 1322–1325
 - [5] MARCUVITZ, N, Waveguide Handbook. New York: McGraw-Hill, 1951
 - [6] KATO, Y and HORIBE, M, "Permittivity measurements and associated uncertainties up to 110 GHz in circular-disk resonator method," 46th European Microwave Conference (EuMC), London, 2016, pp. 1139-1142
 - [7] KATO, Y and HORIBE, M, "Comparison of calculation techniques for Q-factor determination of resonant structures based on influence of VNA measurement uncertainty," IEICE Trans. Electron., vol. E97-C, no. 6, pp. 575–582, Jun 2014
 - [8] ISO/IEC Guide 98-3, *Incertitude de mesure – Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM:1995)*
-

