

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Cylindrical cavity method to measure the complex permittivity of low-loss dielectric rods

Mesure de la permittivité complexe des barreaux diélectriques à faibles pertes par la méthode de la cavité cylindrique

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62810:2015



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2015 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

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

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing 20 000 terms and definitions 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

65 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

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

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

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

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

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

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient 20 000 termes et définitions 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

65 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Cylindrical cavity method to measure the complex permittivity of low-loss dielectric rods

Mesure de la permittivité complexe des barreaux diélectriques à faibles pertes par la méthode de la cavité cylindrique

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 33.120.30

ISBN 978-2-8322-5194-2

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 Measurement parameters	5
4 Theory and calculation equations	5
5 Measurement system.....	12
6 Measurement procedure	14
6.1 Preparation of measurement apparatus.....	14
6.2 Measurement of reference level	14
6.3 Measurement of cavity parameters: σ_r	14
6.4 Measurement of complex permittivity of test sample: ε' , $\tan \delta$	15
Annex A (informative) Example of measurement results and accuracy	16
A.1 Measurement of ε' and $\tan \delta$ values	16
A.2 Measurement uncertainty of ε' and $\tan \delta$	17
Bibliography.....	19
Figure 1 – Structure of a cylindrical cavity resonator.....	6
Figure 2 – Correction factor C_1 for ε'	7
Figure 3 – Correction factor C_2 for $\tan \delta$ with the different values of d_1	9
Figure 4 – Schematic diagram of measurement systems.....	13
Figure 5 – Resonance frequency f_0 , insertion attenuation IA_0 and half-power band width f_{BW}	14
Figure 6 – Frequency responses of the TM_{010} mode of cylindrical cavity	15
Table 1 – Numerical values of correction factor C_1	8
Table 2 – Numerical values of correction factor C_2	10
Table 3 – Numerical values of correction factor C_2	11
Table A.1 – The parameters of the cavity and the rod sample	16
Table A.2 – The resonant frequencies and unloaded Q -factors	16
Table A.3 – The approximate values and the relative conductivity value	16
Table A.4 – Correction factors and the measurement results	16
Table A.5 – The measurement uncertainty of ε'	17
Table A.6 – The measurement uncertainty of $\tan \delta$	18

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**CYLINDRICAL CAVITY METHOD TO MEASURE
THE COMPLEX PERMITTIVITY OF LOW-LOSS DIELECTRIC RODS**

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 62810 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 bilingual version (2017-12) corresponds to the monolingual English version, published in 2015-02.

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

CDV	Report on voting
46F/242/CDV	46F/260/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 website under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62810:2015

CYLINDRICAL CAVITY METHOD TO MEASURE THE COMPLEX PERMITTIVITY OF LOW-LOSS DIELECTRIC RODS

1 Scope

This International Standard relates to a measurement method for complex permittivity of a dielectric rod at microwave frequency. This method has been developed to evaluate the dielectric properties of low-loss materials in coaxial cables and electronic devices used in microwave systems. It uses the TM_{010} mode in a circular cylindrical cavity and presents accurate measurement results of a dielectric rod sample, where the effect of sample insertion holes is taken into account accurately on the basis of the rigorous electromagnetic analysis.

In comparison with the conventional method described in IEC 60556 [2]¹, this method has the following characteristics:

- the values of the relative permittivity ε' and loss tangent $\tan\delta$ of a dielectric rod sample can be measured accurately and non-destructively;
- the measurement accuracy is within 1,0 % for ε' and within 20 % for $\tan\delta$;
- the effect of sample insertion holes is corrected using correction charts presented;
- this method is applicable for the measurements on the following condition:
 - frequency: $1 \text{ GHz} \leq f \leq 10 \text{ GHz}$;
 - relative permittivity: $1 \leq \varepsilon' \leq 100$;
 - loss tangent: $10^{-4} \leq \tan\delta \leq 10^{-1}$.

2 Normative references

Void.

3 Measurement parameters

The measurement parameters are defined as follows:

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

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

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

4 Theory and calculation equations

A resonator structure used in these measurements is shown in Figure 1. A cavity, made with copper, with diameter D and height H has sample insertion holes with diameter d_2 and depth g oriented coaxially. A dielectric rod sample of diameter d_1 having ε' and $\tan\delta$ is inserted into the holes.

¹ Figures in square brackets refer to the Bibliography.

The TM_{010} mode, where the electric field component in the cavity is parallel to the sample rod, is used for the measurement. Taking account of the effect of sample insertion holes calculated on the basis of the rigorous electromagnetic field analysis, ε' and $\tan\delta$ are determined from the measured values of the resonant frequency f_0 and the unloaded Q -factor Q_u . To avoid the tedious numerical calculation and make the measurements easy, the following process is taken in this measurement:

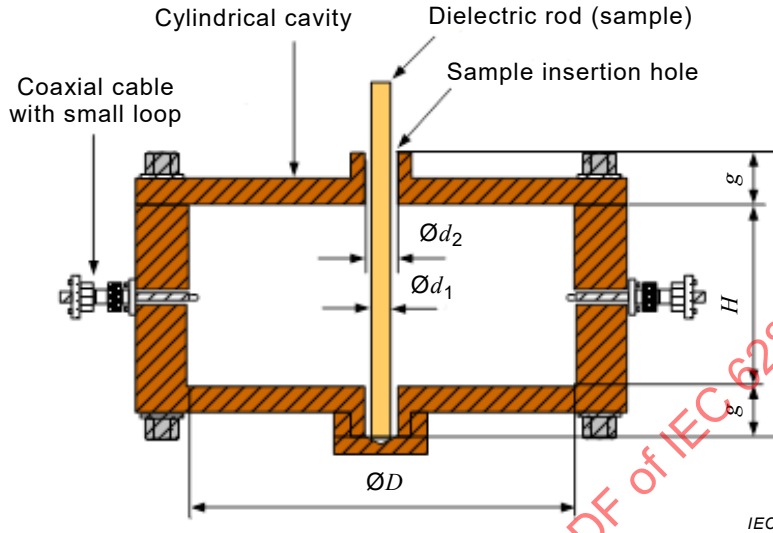


Figure 1 – Structure of a cylindrical cavity resonator

The following steps shall be taken:

- 1) At the first step, obtain approximate values ε_p and $\tan\delta_p$ from the f_0 and Q_u values by using the simple perturbation formulas, where the effect of sample insertion holes is neglected. The subscript p denotes the calculated values using the following perturbation formulas:

$$\varepsilon_p = \frac{1}{\alpha} \frac{f_0 - f_1}{f_1} \left(\frac{D}{d_1} \right)^2 + 1 \quad (3)$$

$$\tan\delta_p = \frac{1}{2\alpha\varepsilon_p} \left(\frac{D}{d_1} \right)^2 \left(\frac{1}{Q_{u1}} - \frac{1}{Q_{u0}} \right) \quad (4)$$

where $\alpha = 1/J_1(x_{01})^2 = 1,855$.

$J_n(x)$ is the Bessel function of order n of first kind and $x_{01} = 2,405$ is the first root of $J_0(x) = 0$. f_0 and Q_{u0} are the resonant frequency and unloaded Q -factor measured for the cavity without a sample, respectively. f_1 and Q_{u1} are ones measured for the cavity with a sample.

- 2) In the second step, obtain accurate values ε' and $\tan\delta$ from ε_p and $\tan\delta_p$ values by using the following equations with correction factors calculated based on the rigorous analysis:

$$\varepsilon' = C_1 \varepsilon_p \quad (5)$$

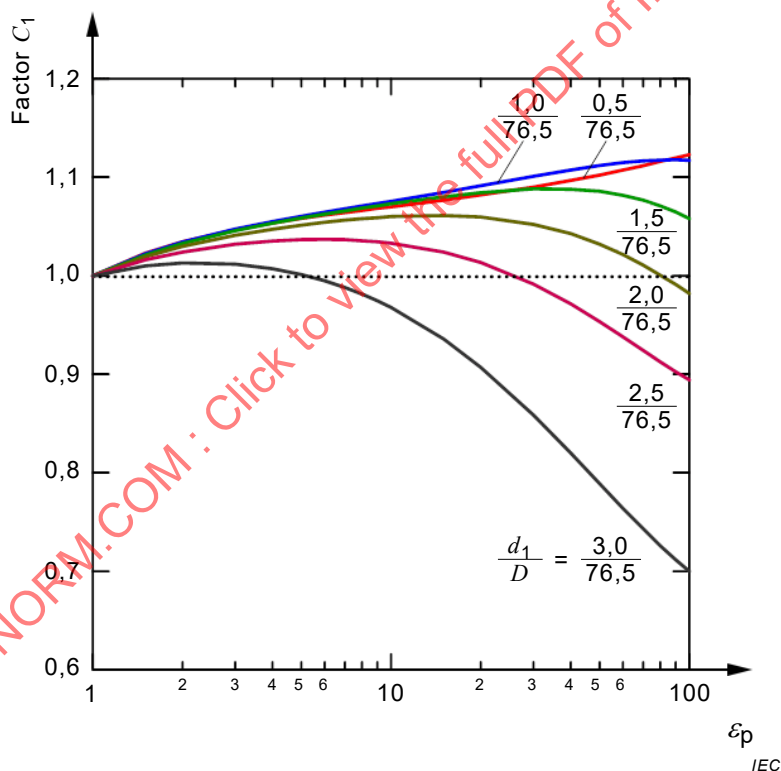
$$\tan\delta = C_2 \tan\delta_p \quad (6)$$

where correction factors C_1 and C_2 , due to the sample insertion holes and errors included in the perturbation formulas, are calculated numerically by using the Ritz-Galerkin method [3][5], as shown in Figure 2 and Figure 3, and the corresponding data are listed in detail in Table 1, 2, and 3. The missing data of C_1 and C_2 can be obtained by interpolation or extrapolation from the tables. The correction factors shown in these figures are calculated for the cavity with $D = 76,5$ mm, $H = 20,0$ mm, $d_2 = 3,0$ mm, and $g = 10,0$ mm, where the resonant frequency is about 3 GHz. C_1 is also used for a cavity having the same aspect ratios as H/D , d_2/D and g/D .

It is found from the analysis for a cavity with insertion holes which constitute a cut-off TM_{01} mode cylindrical waveguide that f_0 converges to a constant value for $g > 10$ mm and $d_2 = 3$ mm. Therefore, the correction factors shown in Figure 2 and Figure 3 are applicable to a dielectric sample rod with $d_1 < 3$ mm and ε' below the value calculated by the following equation for the measured value of the resonant frequency:

$$\varepsilon' \leq \left(\frac{x_{01}c}{\pi d_2 f_0} \right)^2 \quad (7)$$

where c is the velocity of light in a vacuum ($c = 2,9\,979 \times 10^8$ m/s).



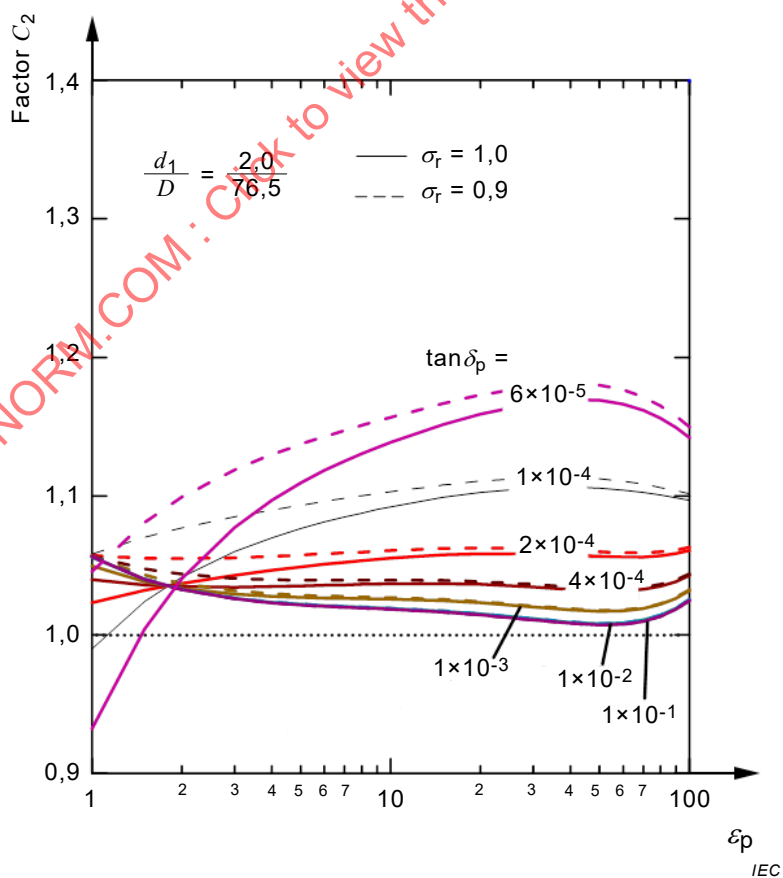
Assumptions

D	76,5 mm	d_2	3,0 mm
H	20,0 mm	g	10,0 mm

Figure 2 – Correction factor C_1 for ε'

Table 1 – Numerical values of correction factor C_1

ε_p	$d_1(\text{mm})$					
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1,5	1,023	1,022	1,021	1,019	1,016	1,010
2	1,035	1,034	1,033	1,030	1,024	1,013
3	1,047	1,047	1,046	1,041	1,032	1,012
4	1,054	1,055	1,053	1,047	1,035	1,007
5	1,058	1,060	1,059	1,051	1,037	1,001
6	1,061	1,064	1,063	1,054	1,037	0,995
7	1,064	1,068	1,066	1,056	1,037	0,988
8	1,066	1,071	1,069	1,058	1,036	0,981
9	1,068	1,073	1,071	1,059	1,035	0,975
10	1,070	1,076	1,073	1,060	1,033	0,968
15	1,077	1,085	1,080	1,061	1,024	0,936
20	1,082	1,091	1,084	1,060	1,013	0,907
30	1,090	1,101	1,088	1,052	0,992	0,859
40	1,097	1,107	1,088	1,043	0,971	0,820
50	1,102	1,112	1,086	1,032	0,953	0,789
60	1,107	1,115	1,082	1,021	0,938	0,764
70	1,112	1,117	1,077	1,011	0,924	0,743
80	1,116	1,118	1,071	1,001	0,912	0,726
90	1,119	1,118	1,065	0,991	0,903	0,712
100	1,123	1,117	1,058	0,982	0,894	0,700



a) Dielectric sample rod with $d_1 = 2,0$ mm

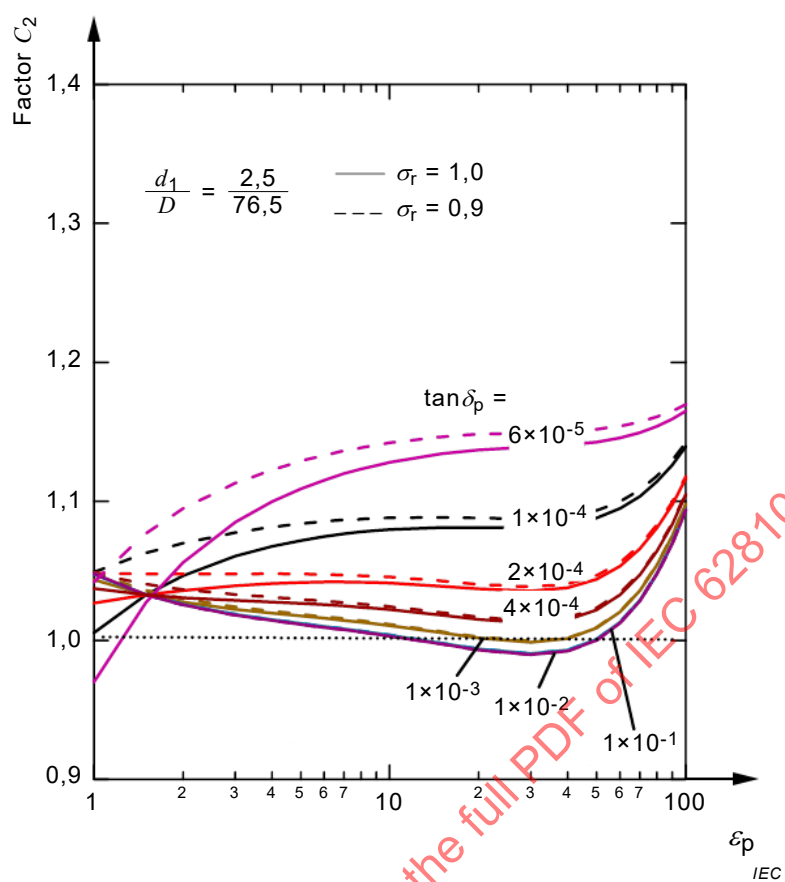
b) Dielectric sample rod with $d_1 = 2,5$ mm**Assumptions** D 76,5 mm d_2 3,0 mm H 20,0 mm g 10,0 mm**Figure 3 – Correction factor C_2 for $\tan \delta$ with the different values of d_1**

Table 2 – Numerical values of correction factor C_2

(Dielectric sample rod with $d_1 = 2,0$ mm)

$\sigma_r=0,9$

ε_p	$\tan\delta_p$						
	6×10^{-5}	1×10^{-4}	2×10^{-4}	4×10^{-4}	1×10^{-3}	1×10^{-2}	1×10^{-1}
1	1,045	1,058	1,057	1,057	1,057	1,056	1,056
1,5	1,081	1,070	1,055	1,048	1,043	1,040	1,040
2	1,099	1,077	1,055	1,044	1,037	1,033	1,033
3	1,119	1,085	1,055	1,041	1,032	1,026	1,026
4	1,130	1,090	1,056	1,040	1,030	1,024	1,023
5	1,137	1,093	1,057	1,039	1,029	1,022	1,021
6	1,143	1,096	1,058	1,039	1,028	1,021	1,020
7	1,147	1,098	1,059	1,039	1,028	1,020	1,020
8	1,151	1,100	1,060	1,039	1,027	1,020	1,019
9	1,154	1,102	1,060	1,039	1,027	1,019	1,019
10	1,157	1,103	1,061	1,039	1,027	1,019	1,018
15	1,167	1,108	1,062	1,039	1,025	1,017	1,016
20	1,173	1,111	1,063	1,038	1,024	1,015	1,014
30	1,179	1,113	1,062	1,036	1,021	1,012	1,011
40	1,181	1,114	1,061	1,034	1,019	1,009	1,008
50	1,180	1,113	1,060	1,033	1,018	1,008	1,007
60	1,177	1,111	1,059	1,033	1,018	1,009	1,008
70	1,172	1,109	1,059	1,034	1,019	1,011	1,010
80	1,165	1,106	1,060	1,036	1,022	1,014	1,013
90	1,158	1,104	1,061	1,040	1,027	1,019	1,018
100	1,150	1,102	1,063	1,044	1,032	1,025	1,025

$\sigma_r=1,0$

ε_p	$\tan\delta_p$						
	6×10^{-5}	1×10^{-4}	2×10^{-4}	4×10^{-4}	1×10^{-3}	1×10^{-2}	1×10^{-1}
1	0,932	0,990	1,023	1,040	1,050	1,056	1,056
1,5	1,004	1,024	1,032	1,036	1,038	1,040	1,040
2	1,040	1,042	1,037	1,035	1,033	1,033	1,032
3	1,077	1,060	1,043	1,034	1,029	1,026	1,026
4	1,097	1,070	1,046	1,035	1,028	1,023	1,023
5	1,110	1,077	1,049	1,035	1,027	1,022	1,021
6	1,118	1,081	1,051	1,036	1,026	1,021	1,020
7	1,125	1,085	1,052	1,036	1,026	1,020	1,020
8	1,131	1,088	1,053	1,036	1,026	1,020	1,019
9	1,135	1,090	1,054	1,037	1,026	1,019	1,019
10	1,139	1,092	1,055	1,037	1,026	1,019	1,018
15	1,152	1,099	1,058	1,037	1,024	1,017	1,016
20	1,159	1,103	1,058	1,036	1,023	1,015	1,014
30	1,167	1,106	1,058	1,034	1,020	1,012	1,011
40	1,170	1,107	1,057	1,033	1,018	1,009	1,008
50	1,169	1,106	1,056	1,032	1,017	1,008	1,007
60	1,166	1,104	1,056	1,032	1,017	1,008	1,008
70	1,162	1,103	1,056	1,033	1,019	1,010	1,010
80	1,156	1,101	1,057	1,035	1,022	1,014	1,013
90	1,150	1,099	1,059	1,038	1,026	1,019	1,018
100	1,142	1,097	1,061	1,043	1,032	1,025	1,025

Table 3 – Numerical values of correction factor C_2 (Dielectric sample rod with $d_1 = 2,5$ mm) $\sigma_r=0,9$

ϵ_p	$\tan \delta_p$						
	6×10^{-5}	1×10^{-4}	2×10^{-4}	4×10^{-4}	1×10^{-3}	1×10^{-2}	1×10^{-1}
1	1,042	1,049	1,049	1,048	1,048	1,048	1,048
1,5	1,077	1,063	1,048	1,040	1,036	1,033	1,033
2	1,095	1,070	1,048	1,037	1,030	1,026	1,026
3	1,113	1,078	1,048	1,033	1,024	1,019	1,018
4	1,123	1,081	1,048	1,031	1,021	1,015	1,014
5	1,129	1,084	1,048	1,030	1,019	1,012	1,012
6	1,133	1,086	1,047	1,028	1,017	1,010	1,009
7	1,136	1,087	1,047	1,027	1,015	1,008	1,008
8	1,139	1,087	1,047	1,026	1,014	1,007	1,006
9	1,141	1,088	1,046	1,025	1,013	1,005	1,004
10	1,142	1,088	1,046	1,024	1,011	1,004	1,003
15	1,146	1,088	1,043	1,020	1,006	0,998	0,997
20	1,148	1,088	1,040	1,017	1,002	0,994	0,993
30	1,150	1,088	1,039	1,014	0,999	0,991	0,990
40	1,150	1,089	1,041	1,016	1,002	0,993	0,992
50	1,152	1,094	1,047	1,023	1,009	1,001	1,000
60	1,154	1,100	1,056	1,034	1,021	1,013	1,012
70	1,157	1,108	1,068	1,048	1,036	1,029	1,028
80	1,161	1,118	1,083	1,065	1,055	1,048	1,048
90	1,165	1,130	1,100	1,084	1,075	1,070	1,069
100	1,170	1,142	1,118	1,106	1,098	1,094	1,094

 $\sigma_r=1,0$

ϵ_p	$\tan \delta_p$						
	6×10^{-5}	1×10^{-4}	2×10^{-4}	4×10^{-4}	1×10^{-3}	1×10^{-2}	1×10^{-1}
1	0,970	1,006	1,027	1,037	1,044	1,048	1,048
1,5	1,027	1,033	1,033	1,033	1,033	1,033	1,033
2	1,056	1,046	1,036	1,031	1,028	1,026	1,026
3	1,085	1,060	1,039	1,029	1,022	1,019	1,018
4	1,100	1,068	1,041	1,028	1,020	1,015	1,014
5	1,109	1,072	1,042	1,027	1,018	1,012	1,012
6	1,115	1,075	1,042	1,026	1,016	1,010	1,009
7	1,120	1,077	1,042	1,025	1,014	1,008	1,008
8	1,123	1,078	1,042	1,024	1,013	1,007	1,006
9	1,126	1,079	1,042	1,023	1,012	1,005	1,004
10	1,128	1,080	1,041	1,022	1,011	1,004	1,003
15	1,134	1,081	1,039	1,018	1,006	0,998	0,997
20	1,137	1,081	1,037	1,015	1,002	0,994	0,993
30	1,139	1,081	1,035	1,012	0,999	0,990	0,990
40	1,141	1,083	1,038	1,015	1,001	0,993	0,992
50	1,143	1,088	1,044	1,022	1,009	1,001	1,000
60	1,146	1,095	1,054	1,033	1,021	1,013	1,012
70	1,150	1,104	1,066	1,047	1,036	1,029	1,028
80	1,154	1,114	1,081	1,064	1,054	1,048	1,048
90	1,159	1,126	1,098	1,084	1,075	1,070	1,069
100	1,165	1,139	1,116	1,105	1,098	1,094	1,094

The value of relative conductivity σ_r is determined from the measured unloaded Q -factor Q_{u0} at f_0 for the TM_{010} mode by the following equation:

$$\sigma_r = \left\{ Q_{u0} \frac{\delta_{s0}}{\lambda_0} \frac{2\pi \left(1 + \frac{D}{2H}\right)}{x_{01}} \right\}^2 \quad (8)$$

where $\lambda_0 = c/f_0$ is the wave length, and the skin depth δ_{s0} at f_0 is defined as follows:

$$\delta_{s0} = \sqrt{\frac{1}{\pi f_0 \mu_0 \sigma_0}} \quad (9)$$

where μ_0 is the permeability of vacuum and $\sigma_0 = 5,8 \times 10^7$ S/m is the conductivity of standard copper.

Measurement uncertainties of ε' and $\tan\delta$, $u(\varepsilon')$ and $u(\tan\delta)$, are estimated as the mean square uncertainty and given respectively by

$$u(\varepsilon')^2 = \left(\frac{\partial \varepsilon'}{\partial f_0} \right)^2 u(f_0)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon'}{\partial f_1} \right)^2 u(f_1)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon'}{\partial d_1} \right)^2 u(d_1)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon'}{\partial D} \right)^2 u(D)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon'}{\partial C_1} \right)^2 u(C_1)^2 \quad (10)$$

$$u(\tan\delta)^2 = \left(\frac{\partial \tan\delta}{\partial \varepsilon_p} \right)^2 u(\varepsilon_p)^2 + \left(\frac{\partial \tan\delta}{\partial d_1} \right)^2 u(d_1)^2 + \left(\frac{\partial \tan\delta}{\partial D} \right)^2 u(D)^2 + \left(\frac{\partial \tan\delta}{\partial Q_{u0}} \right)^2 u(Q_{u0})^2 + \left(\frac{\partial \tan\delta}{\partial Q_{u1}} \right)^2 u(Q_{u1})^2 + \left(\frac{\partial \tan\delta}{\partial C_2} \right)^2 u(C_2)^2 \quad (11)$$

where $u(f_0)$, $u(f_1)$, $u(d_1)$, $u(D)$, and $u(C_1)$ are the standard uncertainties of f_0 , f_1 , d_1 , D , and C_1 , respectively. Also, $u(\tan\delta)$ is mainly attributed to measurement uncertainty of ε_p , d_1 , D , Q_{u0} , Q_{u1} , and C_2 . $u(\varepsilon_p)$, $u(d_1)$, $u(D)$, $u(Q_{u0})$, $u(Q_{u1})$, and $u(C_2)$ are the standard uncertainties of them, respectively.

5 Measurement system

Figure 4 shows a schematic diagram of two equipment systems required for microwave 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 analyser can be used for the measurement shown in Figure 4a. However, a vector network analyser, as shown in Figure 4b, has an advantage in precision of the measurement.

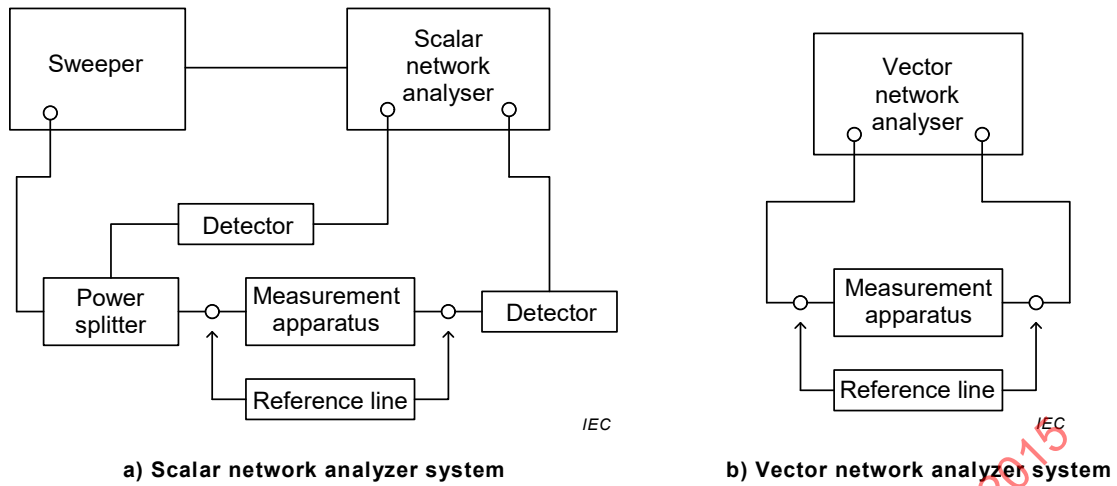


Figure 4 – Schematic diagram of measurement systems

The structure of the TM_{010} mode cylindrical cavity resonator used in the complex permittivity measurement is shown in Figure 1. The cavity has $D = 76,5$ mm, $H = 20,0$ mm, $d_2 = 3,0$ mm, and $g = 10,0$ mm for the measurement around 3 GHz. A sample with diameter $d_1 < d_2$ is coaxially inserted into the holes and excited magnetically by a pair of semi-rigid coaxial cables with 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 resonant frequency f_0 , half-power band width f_{BW} , and the insertion attenuation IA_0 (dB) at f_0 are measured using a network analyser by means of the swept-frequency method, as shown in Figure 5. The value of Q_u is given by

$$Q_u = \frac{Q_L}{1 - 10^{IA_0(\text{dB})/20}}, \quad Q_L = \frac{f_0}{f_{BW}} \quad (12)$$

- 1) At the first step, obtain approximate values ε_p and $\tan\delta_p$ from the f_0 and Q_u values by using the simple perturbation formulas, where the effect of sample insertion holes is neglected. The subscript p denotes the calculated values using the following perturbation formulas:

$$\varepsilon_p = \frac{1}{\alpha} \frac{f_0 - f_1}{f_1} \left(\frac{D}{d_1} \right)^2 + 1 \quad (13)$$

$$\tan\delta_p = \frac{1}{2\alpha\varepsilon_p} \left(\frac{D}{d_1} \right)^2 \left(\frac{1}{Q_{u1}} - \frac{1}{Q_{u0}} \right) \quad (14)$$

where $\alpha = 1/J_1(x_{01})^2 = 1,855$. $J_n(x)$ is the Bessel function of order n of first kind and $x_{01} = 2,405$ is the first root of $J_0(x) = 0$. f_0 and Q_{u0} are the resonant frequency and unloaded Q -factor measured for the cavity without a sample, respectively. f_1 and Q_{u1} are ones measured for the cavity with a sample.

- 2) In the second step, obtain accurate values ε' and $\tan\delta$ from ε_p and $\tan\delta_p$ values by using the following equations with correction factors calculated based on the rigorous analysis:

$$\varepsilon' = C_1 \varepsilon_p \quad (15)$$

$$\tan\delta = C_2 \tan\delta_p \quad (16)$$

where correction factors C_1 and C_2 due to the sample insertion holes and errors included in the perturbation formulas are calculated numerically by using the Ritz-Galerkin method [3][5], as shown in Figure 2 and Figure 3, and the corresponding data are listed in detail in Table 1, 2, and 3. The missing data of C_1 and C_2 can be obtained by interpolation or extrapolation from the tables. The correction factors shown in these figures are calculated for the cavity with $D = 76,5$ mm, $H = 20,0$ mm, $d_2 = 3,0$ mm, and $g = 10,0$ mm, where the resonant frequency is about 3 GHz. C_1 is also used for a cavity having the same aspect ratios as H/D , d_2/D and g/D .

It is found from the analysis for a cavity with insertion holes which constitute a cut-off TM_{01} mode cylindrical waveguide that f_0 converges to a constant value for $g > 10$ mm and $d_2 = 3$ mm. Therefore, the correction factors shown in Figure 2 and Figure 3 are applicable to a dielectric sample rod with $d_1 < 3$ mm and ϵ' below the value calculated by the following equation for the measured value of the resonant frequency:

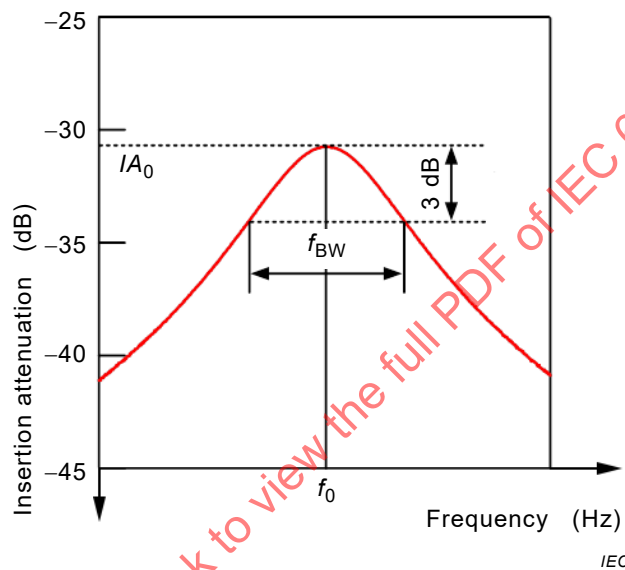


Figure 5 – Resonance frequency f_0 , insertion attenuation IA_0 and half-power band width f_{BW}

6 Measurement procedure

6.1 Preparation of measurement apparatus

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

6.2 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.

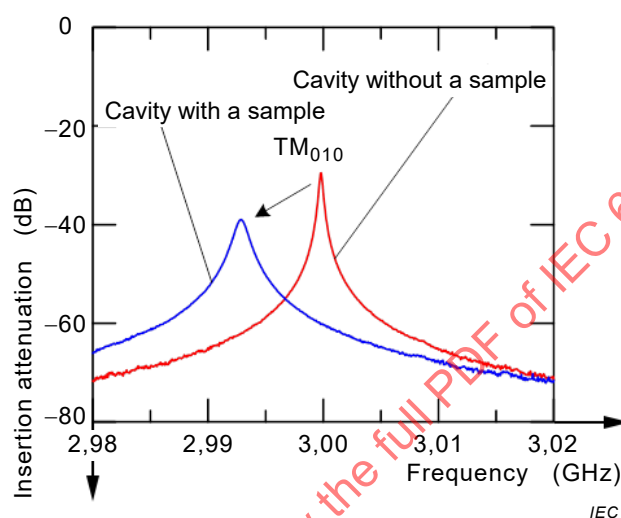
6.3 Measurement of cavity parameters: σ_r

Set the empty cavity and adjust the insertion attenuation IA_0 to be around 30 dB by changing the distance between two semi-rigid cables, as shown in Figure 5.

Measure f_0 , f_{BW} , and IA_0 of the TM_{010} resonant mode. Calculate Q_{u0} by using Equation (12). Then, calculate σ_r by using Equation (8). Since the value of σ_r degrades due to oxidation of the metal surface, it shall be measured periodically. σ_r shall preferably be more than 0,9.

6.4 Measurement of complex permittivity of test sample: ε' , $\tan \delta$

Insert the test sample into the holes. Figure 6 shows the frequency responses of the TM_{010} mode in the cavity with and without a sample. Measure the resonant frequency f_1 , half-power band width f_{BW} and the insertion attenuation IA_0 . Calculate the values of ε_p' and $\tan \delta_p$ by using Equations (3) and (4), respectively. Then, calculate ε' and $\tan \delta$ values by using Equations (5) and (6).



Assumptions

D 76,5 mm

d_2 3,0 mm

H 20,0 mm

g 10,0 mm

Figure 6 – Frequency responses of the TM_{010} mode of cylindrical cavity

Annex A (informative)

Example of measurement results and accuracy

A.1 Measurement of ε' and $\tan\delta$ values

The measurement results of ε' and $\tan\delta$ for polyethylene rod sample are obtained as followed.

- a) The parameters such as D , H and d_2 of the cavity and d_1 of the polyethylene sample used in the measurements are shown in Table A.1.

Table A.1 – The parameters of the cavity and the rod sample

D	H	d_2	d_1
mm	mm	mm	mm
76,50	20,00	3,00	2,52
$\pm 0,02$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$

- b) The resonant frequency f_0 and unloaded Q -factor Q_{u0} of the TM_{010} mode in the cavity without a sample and f_1 and Q_{u1} in the cavity with a sample are measured and shown in Table A.2.

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

f_0 (GHz)	Q_{u0}	f_1 (GHz)	Q_{u1}
2,99992	10264	2,99249	10073
$\pm 0,00001$	± 5	$\pm 0,00001$	± 7

- c) The approximate values ε_p and $\tan\delta_p$ and the value of relative conductivity σ_r are calculated numerically by Equations (3), (4), and (8), respectively, and the results are shown in Table A.3.

Table A.3 – The approximate values and the relative conductivity value

ε_p	$\tan\delta_p (\times 10^{-4})$	σ_r
2,233	2,055	0,889
$\pm 0,010$	$\pm 0,095$	$\pm 0,001$

- d) The correction factors C_1 and C_2 are found from Figure 2 and Figure 3b, respectively, using the calculated values of ε_p , $\tan\delta_p$ and σ_r . The results are shown in Table A.4.

Table A.4 – Correction factors and the measurement results

C_1	C_2	ε'	$\tan\delta (\times 10^{-4})$
1,027	1,047	2,293	2,152
$\pm 0,001$	$\pm 0,001$	$\pm 0,010$	$\pm 0,099$

- e) The accurate values ε' and $\tan\delta$ are obtained from Equations (5) and (6), and these results are also shown in Table A.4.

A.2 Measurement uncertainty of ε' and $\tan\delta$

The measurement uncertainty (see ISO/IEC Guide 98-3) of ε' and $\tan\delta$ is calculated for the polyethylene sample mentioned above by Equation (10) and (11). Each sensitivity coefficients in Equations (10) and (11) are as follows:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \varepsilon'}{\partial f_0} &= \frac{1}{\alpha} \frac{1}{f_1} \left(\frac{D}{d_1} \right)^2 C_1 \\ \frac{\partial \varepsilon'}{\partial f_1} &= \frac{1}{\alpha} \left(-\frac{f_0}{f_1^2} \right) \left(\frac{D}{d_1} \right)^2 C_1 \\ \frac{\partial \varepsilon'}{\partial d_1} &= \frac{1}{\alpha} \frac{f_0 - f_1}{f_1} \left(-2 \frac{D^2}{d_1^3} \right) C_1 \\ \frac{\partial \varepsilon'}{\partial D} &= \frac{1}{\alpha} \frac{f_0 - f_1}{f_1} \left(\frac{2D}{d_1^2} \right) C_1 \\ \frac{\partial \varepsilon'}{\partial C_1} &= \frac{1}{\alpha} \frac{f_0 - f_1}{f_1} \left(\frac{D}{d_1} \right)^2 \\ \frac{\partial \tan\delta}{\partial \varepsilon_p} &= -\frac{1}{\varepsilon_p^2} \frac{1}{2\alpha} \left(\frac{D}{d_1} \right)^2 \left\{ \frac{1}{Q_{u1}} - \frac{1}{Q_{u0}} \right\} C_2 \\ \frac{\partial \tan\delta}{\partial d_1} &= \frac{1}{\varepsilon_p} \frac{1}{2\alpha} \left(-2 \frac{D^2}{d_1^3} \right) \left\{ \frac{1}{Q_{u1}} - \frac{1}{Q_{u0}} \right\} C_2 \\ \frac{\partial \tan\delta}{\partial D} &= \frac{1}{\varepsilon_p} \frac{1}{2\alpha} \left(\frac{2D}{d_1^2} \right) \left\{ \frac{1}{Q_{u1}} - \frac{1}{Q_{u0}} \right\} C_2 \\ \frac{\partial \tan\delta}{\partial Q_{u0}} &= \frac{1}{\varepsilon_p} \frac{1}{2\alpha} \left(\frac{D}{d_1} \right)^2 \left\{ \frac{1}{Q_{u0}^2} \right\} C_2 \\ \frac{\partial \tan\delta}{\partial Q_{u1}} &= \frac{1}{\varepsilon_p} \frac{1}{2\alpha} \left(\frac{D}{d_1} \right)^2 \left\{ -\frac{1}{Q_{u1}^2} \right\} C_2 \\ \frac{\partial \tan\delta}{\partial C_2} &= \frac{1}{\varepsilon_p} \frac{1}{2\alpha} \left(\frac{D}{d_1} \right)^2 \left\{ \frac{1}{Q_{u1}} - \frac{1}{Q_{u0}} \right\}\end{aligned}$$

The results are shown in Table A.5 and A.6.

Table A.5 – The measurement uncertainty of ε'

	$\frac{\partial \varepsilon'}{\partial f_0} u(f_0)$	$\frac{\partial \varepsilon'}{\partial f_1} u(f_1)$	$\frac{\partial \varepsilon'}{\partial d_1} u(d_1)$	$\frac{\partial \varepsilon'}{\partial D} u(D)$	$\frac{\partial \varepsilon'}{\partial C_1} u(C_1)$	$u(\varepsilon')$
Sensitivity	$1,7050 \times 10^{-7}$	$-1,7092 \times 10^{-7}$	$-1,0054 \times 10^{-3}$	$3,3119 \times 10^{-1}$	$1,2335 \times 10^0$	----
uncertainty	0,0017	0,0017	0,0101	0,0007	0,0012	0,0104

Table A.6 – The measurement uncertainty of $\tan \delta$

	$\frac{\partial \tan \delta}{\partial \varepsilon_p} u(\varepsilon_p)$	$\frac{\partial \tan \delta}{\partial d_1} u(d_1)$	$\frac{\partial \tan \delta}{\partial D} u(D)$	$\frac{\partial \tan \delta}{\partial Q_{u0}} u(Q_{u0})$	$\frac{\partial \tan \delta}{\partial Q_{u1}} u(Q_{u1})$	$\frac{\partial \tan \delta}{\partial C_2} u(C_2)$	$u(\tan \delta)$
Sensitivity	$-9,6313 \times 10^{-5}$	$-1,7073 \times 10^{-1}$	$5,6239 \times 10^{-3}$	$1,1053 \times 10^{-6}$	$-1,1476 \times 10^{-6}$	$2,0546 \times 10^{-4}$	----
uncertainty	$0,00972 \times 10^{-4}$	$0,01707 \times 10^{-4}$	$0,00112 \times 10^{-4}$	$0,05526 \times 10^{-4}$	$0,08033 \times 10^{-4}$	$0,00205 \times 10^{-4}$	$0,09949 \times 10^{-4}$

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62810:2015

Bibliography

- [1] ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*
- [2] IEC 60556, *Gyromagnetic materials intended for application at microwave frequencies – Measuring methods for properties*
- [3] ESTIN, A.J. and H.E.BUSSEY, H.E., *Errors in dielectric measurements due to a sample insertion hole in a cavity*, IRE Trans. Microwave Theory & Tech., vol.MTT-8, no.6, pp.650-653, Nov. 1960
- [4] KAWABATA, H., TANPO, H. and KOBAYASHI, Y., *An improvement of the perturbation method using a TM_{010} mode cylindrical cavity*, IEICE Trans. Electron., vol.E86-C, no.12, pp.2371-2379, Dec. 2003
- [5] KANEKO, S., KAWABATA, H. and KOBAYASHI, Y., *Improved perturbation method of complex permittivity using correction charts for TM_{010} and TM_{020} modes of a circular cylindrical cavity*" Proc. 2010 Asia-Pacific Microwave Conf., TH3G-47, pp.1448-1451, Dec. 2010
- [6] WEISSTEIN, Eric W., *Galerkin Method*, from MathWorld – A Wolfram Web Resource. <http://mathworld.wolfram.com/GalerkinMethod.html> (website checked 2014.12.22)

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62810:2015

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	21
1 Domaine d'application	23
2 Références normatives	23
3 Paramètres de mesure	23
4 Théorie et équations de calcul	24
5 Système de mesure	31
6 Procédure de mesure	33
6.1 Préparation de l'appareil de mesure	33
6.2 Mesure du niveau de référence	33
6.3 Mesure des paramètres de la cavité: σ_r	34
6.4 Mesure de la permittivité complexe de l'échantillon d'essai: ε' , $\tan \delta$	34
Annexe A (informative) Exemple de résultats de mesure et précision de mesure	35
A.1 Mesure des valeurs ε' et $\tan \delta$	35
A.2 Incertitude de mesure de ε' et de $\tan \delta$	36
Bibliographie	38
Figure 1 – Structure d'un résonateur à cavité cylindrique	24
Figure 2 – Facteur de correction C_1 pour ε'	26
Figure 3 – Facteur de correction C_2 pour $\tan \delta$ avec les différentes valeurs de d_1	28
Figure 4 – Représentation schématique des systèmes de mesure	32
Figure 5 – Fréquence de résonance f_0 , affaiblissement d'insertion IA_0 et bande passante à mi-puissance f_{BW}	33
Figure 6 – Réponses en fréquences du mode TM_{010} de la cavité cylindrique	34
Tableau 1 – Valeurs numériques du facteur de correction C_1	26
Tableau 2 – Valeurs numériques du facteur de correction C_2	29
Tableau 3 – Valeurs numériques du facteur de correction C_2	30
Tableau A.1 – Paramètres de la cavité et de l'échantillon de barreau	35
Tableau A.2 – Fréquences de résonance et facteurs Q à vide	35
Tableau A.3 – Valeurs approchées et valeur de la conductivité relative	35
Tableau A.4 – Facteurs de correction et résultats de mesure	36
Tableau A.5 – Incertitude de mesure de ε'	37
Tableau A.6 – Incertitude de mesure de $\tan \delta$	37

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**MESURE DE LA PERMITTIVITÉ COMPLEXE DES BARREAUX
DIÉLECTRIQUES À FAIBLES PERTES PAR LA MÉTHODE
DE LA CAVITÉ CYLINDRIQUE**

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 d'autre part attirée sur le fait que certains des éléments de la présente publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence.

La Norme internationale IEC 62810 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.

La présente version bilingue (2017-12) correspond à la version anglaise monolingue publiée en 2015-02.

Le texte anglais de cette norme est issu des documents 46F/242/CDV et 46F/260/RVC.

Le rapport de vote 46F/260/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/IEC, Partie 2.

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

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62810:2015

MESURE DE LA PERMITTIVITÉ COMPLEXE DES BARREAUX DIÉLECTRIQUES À FAIBLES PERTES PAR LA MÉTHODE DE LA CAVITÉ CYLINDRIQUE

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale traite d'une méthode de mesure de la permittivité complexe d'un barreau diélectrique en hyperfréquence. La présente méthode a été développée pour évaluer les propriétés diélectriques des matériaux à faibles pertes dans les câbles coaxiaux et les dispositifs électroniques utilisés dans les systèmes à hyperfréquences. Elle utilise le mode TM_{010} dans une cavité cylindrique circulaire et présente des résultats de mesure précis d'un échantillon de barreau diélectrique, pour lequel l'effet des trous d'insertion de l'échantillon est pris en compte avec précision, en se fondant sur l'analyse électromagnétique rigoureuse.

En comparaison avec la méthode conventionnelle décrite dans l'IEC 60556 [2]¹, cette méthode comporte les caractéristiques suivantes:

- les valeurs de la permittivité relative ε' et de la tangente de l'angle de perte $\tan\delta$ d'un échantillon de barreau diélectrique peuvent être mesurées avec précision et de manière non destructive;
- la précision de mesure est de 1,0 % pour ε' et de 20 % pour $\tan\delta$;
- l'effet des trous d'insertion des échantillons est corrigé à l'aide des abaques de correction présentés;
- cette méthode est applicable pour effectuer des mesures dans les conditions suivantes:
 - fréquence: $1 \text{ GHz} \leq f \leq 10 \text{ GHz}$;
 - permittivité relative: $1 \leq \varepsilon' \leq 100$;
 - tangente de l'angle de perte: $10^{-4} \leq \tan\delta \leq 10^{-1}$.

2 Références normatives

Vide.

3 Paramètres de mesure

Les paramètres de mesure sont définis comme suit:

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

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

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

¹ Les chiffres entre crochets font référence à la Bibliographie.

4 Théorie et équations de calcul

Une structure de résonateur utilisée dans ces mesures est représentée à la Figure 1. Une cavité, constituée de cuivre, de diamètre D et de hauteur H comporte des trous d'insertion d'échantillons de diamètre d_2 et profondeur g orientés sur le même axe. Un échantillon de barreau diélectrique de diamètre d_1 comportant les valeurs ε' et $\tan\delta$ est inséré dans les trous.

Le mode TM_{010} , pour lequel la composante du champ électrique dans la cavité est parallèle à l'échantillon de barreau, est utilisé pour la mesure. En tenant compte de l'effet des trous d'insertion de l'échantillon, calculé en se fondant sur l'analyse rigoureuse du champ électromagnétique, les valeurs ε' et $\tan\delta$ sont déterminées d'après les valeurs mesurées de la fréquence de résonance f_0 et du facteur Q à vide Q_u . Pour éviter ce calcul numérique fastidieux et effectuer aisément les mesures, le processus suivant est compris dans cette mesure:

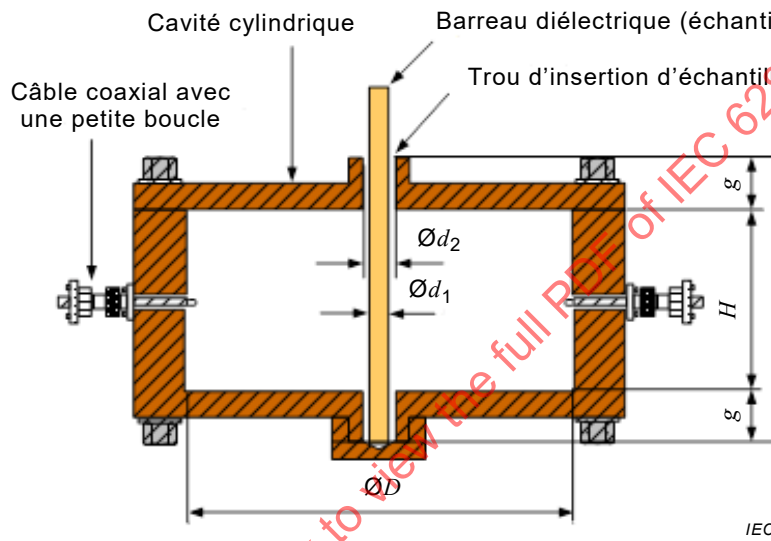


Figure 1 – Structure d'un résonateur à cavité cylindrique

Les étapes suivantes doivent être exécutées:

- 1) A la première étape, trouver les valeurs approchées ε_p et $\tan\delta_p$ d'après les valeurs f_0 et Q_u à l'aide des formules de perturbation simples, dans lesquelles l'effet des trous d'insertion est ignoré. L'indice p indique les valeurs calculées à l'aide des formules de perturbation suivantes:

$$\varepsilon_p = \frac{1}{\alpha} \frac{f_0 - f_1}{f_1} \left(\frac{D}{d_1} \right)^2 + 1 \quad (3)$$

$$\tan\delta_p = \frac{1}{2\alpha\varepsilon_p} \left(\frac{D}{d_1} \right)^2 \left(\frac{1}{Q_{u1}} - \frac{1}{Q_{u0}} \right) \quad (4)$$

où $\alpha = 1/J_1(x_{01})^2 = 1,855$.

$J_n(x)$ est la fonction de Bessel d'ordre n de première espèce et $x_{01} = 2,405$ est la première racine de $J_0(x) = 0$. f_0 et Q_{u0} sont respectivement la fréquence de résonance et le facteur Q à vide mesurés pour la cavité sans échantillon. f_1 et Q_{u1} sont les mêmes valeurs mesurées pour la cavité contenant un échantillon.

- 2) A la seconde étape, trouver les valeurs précises ε' et $\tan\delta$ d'après les valeurs ε_p et $\tan\delta_p$ à l'aide des équations suivantes dont les facteurs correction sont calculés en s'appuyant sur l'analyse rigoureuse;

$$\varepsilon' = C_1 \varepsilon_p \quad (5)$$

$$\tan\delta = C_2 \tan\delta_p \quad (6)$$

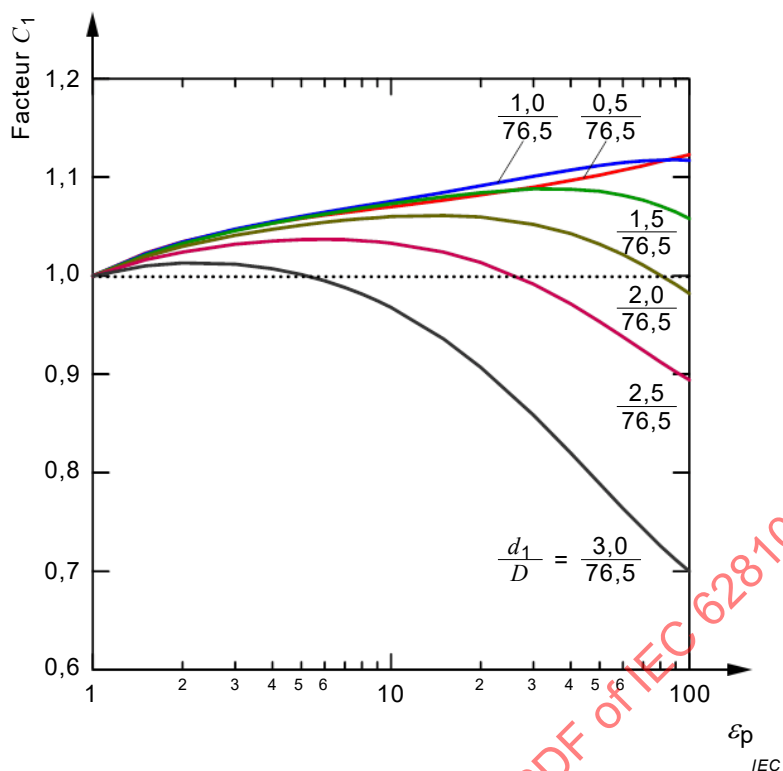
où les facteurs de correction C_1 et C_2 du fait des trous d'insertion d'échantillon et des erreurs figurant dans les formules de perturbation sont calculés numériquement à l'aide de la méthode de Ritz-Galerkin [3][5], comme représenté à la Figure 2 – Facteur de correction C_1 pour ε'

et à la Figure 3, et les données correspondantes figurent en détail dans les Tableaux 1, 2 et 3. Les données manquantes de C_1 et C_2 peuvent être obtenues par interpolation ou extrapolation à partir des tableaux. Les facteurs de correction représentés dans ces figures sont calculés pour la cavité avec les valeurs de $D = 76,5$ mm, $H = 20,0$ mm, $d_2 = 3,0$ mm et $g = 10,0$ mm, où la fréquence de résonance est d'environ 3 GHz. C_1 est également utilisé pour une cavité ayant les mêmes rapports de forme que H/D , d_2/D et g/D .

Pour une cavité avec des trous d'insertion qui constituent un guide d'ondes cylindrique en mode TM_{01} de coupure, l'analyse révèle que f_0 converge à une valeur constante pour $g > 10$ mm et $d_2 = 3$ mm. Par conséquent, les facteurs de correction représentés à la Figure 2 et à la Figure 3 sont applicables à un échantillon de barreau diélectrique avec $d_1 < 3$ mm et la valeur de ε' inférieure à la valeur calculée par l'équation suivante pour la valeur mesurée de la fréquence de résonance:

$$\varepsilon' \leq \left(\frac{x_{01}c}{\pi d_2 f_0} \right)^2 \quad (7)$$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide ($c = 2,9979 \times 10^8$ m/s).



Hypothèses

D 76,5 mm

H 20,0 mm

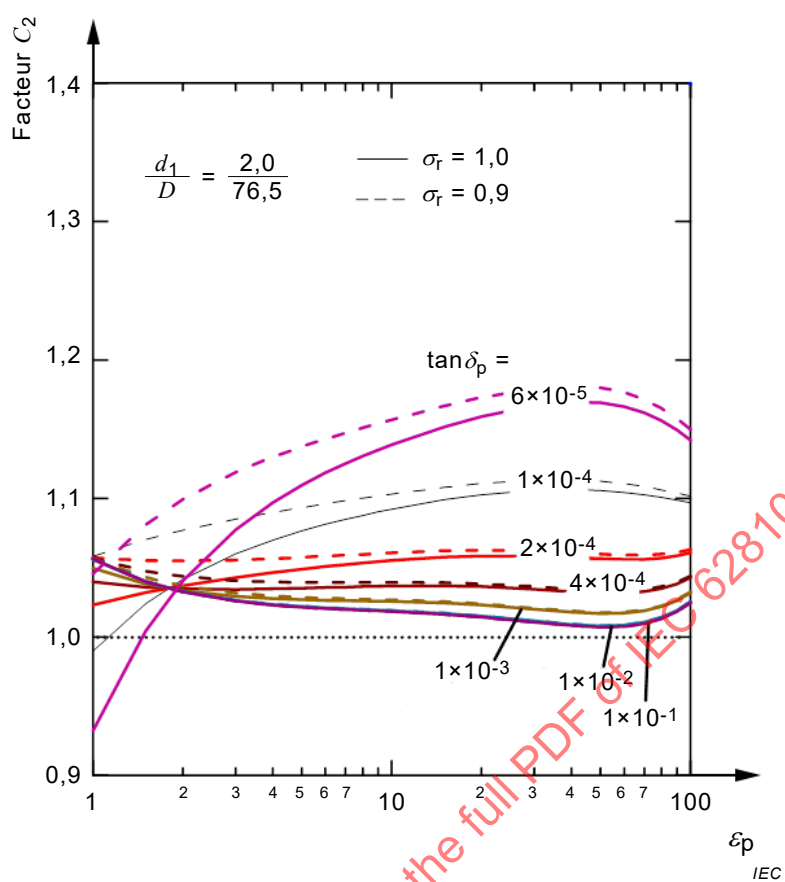
d_2 3,0 mm

g 10,0 mm

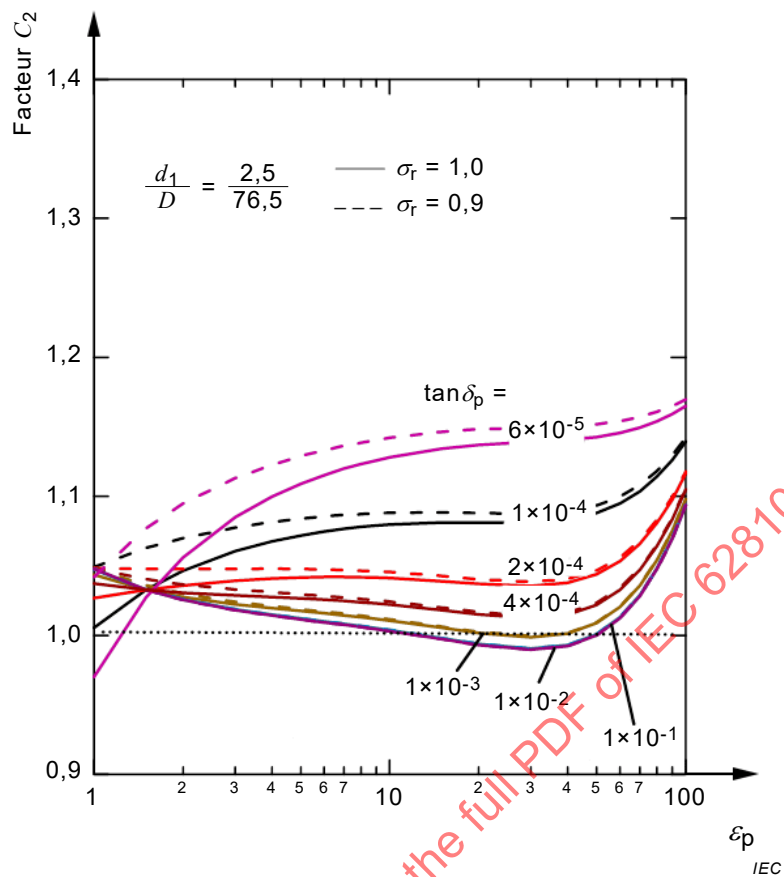
Figure 2 – Facteur de correction C_1 pour ε'

Tableau 1 – Valeurs numériques du facteur de correction C_1

ε_p	d_1 (mm)					
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1,5	1,023	1,022	1,021	1,019	1,016	1,010
2	1,035	1,034	1,033	1,030	1,024	1,013
3	1,047	1,047	1,046	1,041	1,032	1,012
4	1,054	1,055	1,053	1,047	1,035	1,007
5	1,058	1,060	1,059	1,051	1,037	1,001
6	1,061	1,064	1,063	1,054	1,037	0,995
7	1,064	1,068	1,066	1,056	1,037	0,988
8	1,066	1,071	1,069	1,058	1,036	0,981
9	1,068	1,073	1,071	1,059	1,035	0,975
10	1,070	1,076	1,073	1,060	1,033	0,968
15	1,077	1,085	1,080	1,061	1,024	0,936
20	1,082	1,091	1,084	1,060	1,013	0,907
30	1,090	1,101	1,088	1,052	0,992	0,859
40	1,097	1,107	1,088	1,043	0,971	0,820
50	1,102	1,112	1,086	1,032	0,953	0,789
60	1,107	1,115	1,082	1,021	0,938	0,764
70	1,112	1,117	1,077	1,011	0,924	0,743
80	1,116	1,118	1,071	1,001	0,912	0,726
90	1,119	1,118	1,065	0,991	0,903	0,712
100	1,123	1,117	1,058	0,982	0,894	0,700



a) Échantillon de barreau diélectrique avec $d_1 = 2.0$ mm



b) Échantillon de barreau diélectrique avec $d_1 = 2,5$ mm

Hypothèses

D 76,5 mm

d_2 3,0 mm

H 20,0 mm

g 10,0 mm

Figure 3 – Facteur de correction C_2 pour $\tan \delta$ avec les différentes valeurs de d_1

Tableau 2 – Valeurs numériques du facteur de correction C_2 (Échantillon de barreau diélectrique avec $d_1 = 2,0$ mm) $\sigma_r=0,9$

ε_p	$\tan\delta_p$						
	6×10^{-5}	1×10^{-4}	2×10^{-4}	4×10^{-4}	1×10^{-3}	1×10^{-2}	1×10^{-1}
1	1,045	1,058	1,057	1,057	1,057	1,056	1,056
1,5	1,081	1,070	1,055	1,048	1,043	1,040	1,040
2	1,099	1,077	1,055	1,044	1,037	1,033	1,033
3	1,119	1,085	1,055	1,041	1,032	1,026	1,026
4	1,130	1,090	1,056	1,040	1,030	1,024	1,023
5	1,137	1,093	1,057	1,039	1,029	1,022	1,021
6	1,143	1,096	1,058	1,039	1,028	1,021	1,020
7	1,147	1,098	1,059	1,039	1,028	1,020	1,020
8	1,151	1,100	1,060	1,039	1,027	1,020	1,019
9	1,154	1,102	1,060	1,039	1,027	1,019	1,019
10	1,157	1,103	1,061	1,039	1,027	1,019	1,018
15	1,167	1,108	1,062	1,039	1,025	1,017	1,016
20	1,173	1,111	1,063	1,038	1,024	1,015	1,014
30	1,179	1,113	1,062	1,036	1,021	1,012	1,011
40	1,181	1,114	1,061	1,034	1,019	1,009	1,008
50	1,180	1,113	1,060	1,033	1,018	1,008	1,007
60	1,177	1,111	1,059	1,033	1,018	1,009	1,008
70	1,172	1,109	1,059	1,034	1,019	1,011	1,010
80	1,165	1,106	1,060	1,036	1,022	1,014	1,013
90	1,158	1,104	1,061	1,040	1,027	1,019	1,018
100	1,150	1,102	1,063	1,044	1,032	1,025	1,025

 $\sigma_r=1,0$

ε_p	$\tan\delta_p$						
	6×10^{-5}	1×10^{-4}	2×10^{-4}	4×10^{-4}	1×10^{-3}	1×10^{-2}	1×10^{-1}
1	0,932	0,990	1,023	1,040	1,050	1,056	1,056
1,5	1,004	1,024	1,032	1,036	1,038	1,040	1,040
2	1,040	1,042	1,037	1,035	1,033	1,033	1,032
3	1,077	1,060	1,043	1,034	1,029	1,026	1,026
4	1,097	1,070	1,046	1,035	1,028	1,023	1,023
5	1,110	1,077	1,049	1,035	1,027	1,022	1,021
6	1,118	1,081	1,051	1,036	1,026	1,021	1,020
7	1,125	1,085	1,052	1,036	1,026	1,020	1,020
8	1,131	1,088	1,053	1,036	1,026	1,020	1,019
9	1,135	1,090	1,054	1,037	1,026	1,019	1,019
10	1,139	1,092	1,055	1,037	1,026	1,019	1,018
15	1,152	1,099	1,058	1,037	1,024	1,017	1,016
20	1,159	1,103	1,058	1,036	1,023	1,015	1,014
30	1,167	1,106	1,058	1,034	1,020	1,012	1,011
40	1,170	1,107	1,057	1,033	1,018	1,009	1,008
50	1,169	1,106	1,056	1,032	1,017	1,008	1,007
60	1,166	1,104	1,056	1,032	1,017	1,008	1,008
70	1,162	1,103	1,056	1,033	1,019	1,010	1,010
80	1,156	1,101	1,057	1,035	1,022	1,014	1,013
90	1,150	1,099	1,059	1,038	1,026	1,019	1,018
100	1,142	1,097	1,061	1,043	1,032	1,025	1,025

Tableau 3 – Valeurs numériques du facteur de correction C_2

(Échantillon de barreau diélectrique avec $d_1 = 2,5$ mm)

$\sigma_r=0,9$

ε_p	$\tan \delta_p$						
	6×10^{-5}	1×10^{-4}	2×10^{-4}	4×10^{-4}	1×10^{-3}	1×10^{-2}	1×10^{-1}
1	1,042	1,049	1,049	1,048	1,048	1,048	1,048
1,5	1,077	1,063	1,048	1,040	1,036	1,033	1,033
2	1,095	1,070	1,048	1,037	1,030	1,026	1,026
3	1,113	1,078	1,048	1,033	1,024	1,019	1,018
4	1,123	1,081	1,048	1,031	1,021	1,015	1,014
5	1,129	1,084	1,048	1,030	1,019	1,012	1,012
6	1,133	1,086	1,047	1,028	1,017	1,010	1,009
7	1,136	1,087	1,047	1,027	1,015	1,008	1,008
8	1,139	1,087	1,047	1,026	1,014	1,007	1,006
9	1,141	1,088	1,046	1,025	1,013	1,005	1,004
10	1,142	1,088	1,046	1,024	1,011	1,004	1,003
15	1,146	1,088	1,043	1,020	1,006	0,998	0,997
20	1,148	1,088	1,040	1,017	1,002	0,994	0,993
30	1,150	1,088	1,039	1,014	0,999	0,991	0,990
40	1,150	1,089	1,041	1,016	1,002	0,993	0,992
50	1,152	1,094	1,047	1,023	1,009	1,001	1,000
60	1,154	1,100	1,056	1,034	1,021	1,013	1,012
70	1,157	1,108	1,068	1,048	1,036	1,029	1,028
80	1,161	1,118	1,083	1,065	1,055	1,048	1,048
90	1,165	1,130	1,100	1,084	1,075	1,070	1,069
100	1,170	1,142	1,118	1,106	1,098	1,094	1,094

$\sigma_r=1,0$

ε_p	$\tan \delta_p$						
	6×10^{-5}	1×10^{-4}	2×10^{-4}	4×10^{-4}	1×10^{-3}	1×10^{-2}	1×10^{-1}
1	0,970	1,006	1,027	1,037	1,044	1,048	1,048
1,5	1,027	1,033	1,033	1,033	1,033	1,033	1,033
2	1,056	1,046	1,036	1,031	1,028	1,026	1,026
3	1,085	1,060	1,039	1,029	1,022	1,019	1,018
4	1,100	1,068	1,041	1,028	1,020	1,015	1,014
5	1,109	1,072	1,042	1,027	1,018	1,012	1,012
6	1,115	1,075	1,042	1,026	1,016	1,010	1,009
7	1,120	1,077	1,042	1,025	1,014	1,008	1,008
8	1,123	1,078	1,042	1,024	1,013	1,007	1,006
9	1,126	1,079	1,042	1,023	1,012	1,005	1,004
10	1,128	1,080	1,041	1,022	1,011	1,004	1,003
15	1,134	1,081	1,039	1,018	1,006	0,998	0,997
20	1,137	1,081	1,037	1,015	1,002	0,994	0,993
30	1,139	1,081	1,035	1,012	0,999	0,990	0,990
40	1,141	1,083	1,038	1,015	1,001	0,993	0,992
50	1,143	1,088	1,044	1,022	1,009	1,001	1,000
60	1,146	1,095	1,054	1,033	1,021	1,013	1,012
70	1,150	1,104	1,066	1,047	1,036	1,029	1,028
80	1,154	1,114	1,081	1,064	1,054	1,048	1,048
90	1,159	1,126	1,098	1,084	1,075	1,070	1,069
100	1,165	1,139	1,116	1,105	1,098	1,094	1,094

La valeur de la conductivité relative σ_r est déterminée d'après le facteur Q à vide Q_{u0} à f_0 pour le mode TM_{010} par l'équation suivante:

$$\sigma_r = \left\{ Q_{u0} \frac{\delta_{s0}}{\lambda_0} \frac{2\pi \left(1 + \frac{D}{2H}\right)}{x_{01}} \right\}^2 \quad (8)$$

où $\lambda_0 = c/f_0$ est la longueur d'onde, et la profondeur de l'effet de peau δ_{s0} à f_0 est définie comme suit:

$$\delta_{s0} = \sqrt{\frac{1}{\pi f_0 \mu_0 \sigma_0}} \quad (9)$$

où μ_0 est la permittivité dans le vide et $\sigma_0 = 5,8 \times 10^7$ S/m est la conductivité du cuivre de référence.

Les incertitudes de mesure de ε' et $\tan\delta$, $u(\varepsilon')$ et $u(\tan\delta)$, sont estimées comme les incertitudes quadratiques moyennes et elles sont respectivement données par

$$u(\varepsilon')^2 = \left(\frac{\partial \varepsilon'}{\partial f_0}\right)^2 u(f_0)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon'}{\partial f_1}\right)^2 u(f_1)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon'}{\partial d_1}\right)^2 u(d_1)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon'}{\partial D}\right)^2 u(D)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon'}{\partial C_1}\right)^2 u(C_1)^2 \quad (10)$$

$$u(\tan\delta)^2 = \left(\frac{\partial \tan\delta}{\partial \varepsilon_p}\right)^2 u(\varepsilon_p)^2 + \left(\frac{\partial \tan\delta}{\partial d_1}\right)^2 u(d_1)^2 + \left(\frac{\partial \tan\delta}{\partial D}\right)^2 u(D)^2 + \left(\frac{\partial \tan\delta}{\partial Q_{u0}}\right)^2 u(Q_{u0})^2 + \left(\frac{\partial \tan\delta}{\partial Q_{u1}}\right)^2 u(Q_{u1})^2 + \left(\frac{\partial \tan\delta}{\partial C_2}\right)^2 u(C_2)^2 \quad (11)$$

où $u(f_0)$, $u(f_1)$, $u(d_1)$, $u(D)$ et $u(C_1)$ sont les incertitudes-types de f_0 , f_1 , d_1 , D et C_1 , respectivement. D'autre part, $u(\tan\delta)$ est principalement attribué aux incertitudes de mesure de ε_p , d_1 , D , Q_{u0} , Q_{u1} et C_2 . Dont $u(\varepsilon_p)$, $u(d_1)$, $u(D)$, $u(Q_{u0})$, $u(Q_{u1})$ et $u(C_2)$ sont les incertitudes-types respectives.

5 Système de mesure

La Figure 4 représente un schéma de deux systèmes de matériel exigés pour une mesure en hyperfréquences. 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 exigées. Ainsi, un analyseur de réseau scalaire peut être utilisé pour effectuer la mesure représentée à la Figure 4a. Toutefois, un analyseur de réseau vectoriel, représenté à la Figure 4b, a pour avantage la précision de la mesure.