

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Superconductivity –

Part 16: Electronic characteristic measurements – Power-dependent surface resistance of superconductors at microwave frequencies

Supraconductivité –

Partie 16: Mesures de caractéristiques électroniques – Résistance de surface des supraconducteurs aux hyperfréquences en fonction de la puissance

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-16:2013



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2013 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

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

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

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.

Useful links:

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

The advanced search enables you 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It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.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 on-line and also once a month by email.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 30 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) on-line.

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 la CEI

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

A propos des publications CEI

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

Liens utiles:

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

La recherche avancée vous permet de trouver des publications CEI 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.

Just Published CEI - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. 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 au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 30 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) en ligne.

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



Superconductivity –

Part 16: Electronic characteristic measurements – Power-dependent surface resistance of superconductors at microwave frequencies

Supraconductivité –

Partie 16: Mesures de caractéristiques électroniques – Résistance de surface des supraconducteurs aux hyperfréquences en fonction de la puissance

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX



ICS 17.220.20; 29.050

ISBN 978-2-83220-582-2

**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.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references	7
3 Terms and definitions	7
4 Requirements	8
5 Apparatus.....	8
5.1 Measurement system	8
5.1.1 Measurement system for the $\tan \delta$ of the sapphire rod.....	8
5.1.2 Measurement system for the power dependence of the surface resistance of superconductors at microwave frequencies.....	9
5.2 Measurement apparatus.....	10
5.2.1 Sapphire resonator	10
5.2.2 Sapphire rod.....	10
5.2.3 Superconductor films	11
6 Measurement procedure	11
6.1 Set-up	11
6.2 Measurement of the $\tan \delta$ of the sapphire rod.....	11
6.2.1 General	11
6.2.2 Measurement of the frequency response of the TE ₀₂₁ mode.....	11
6.2.3 Measurement of the frequency response of the TE ₀₁₂ mode.....	13
6.2.4 Determination of $\tan \delta$ of the sapphire rod	13
6.3 Power dependence measurement.....	14
6.3.1 General	14
6.3.2 Calibration of the incident microwave power to the resonator.....	15
6.3.3 Measurement of the reference level.....	15
6.3.4 Surface resistance measurement as a function of the incident microwave power.....	15
6.3.5 Determination of the maximum surface magnetic flux density	15
7 Uncertainty of the test method	16
7.1 Surface resistance.....	16
7.2 Temperature.....	17
7.3 Specimen and holder support structure	18
7.4 Specimen protection.....	18
8 Test report.....	18
8.1 Identification of the test specimen	18
8.2 Report of power dependence of R_s values.....	18
8.3 Report of test conditions.....	18
Annex A (informative) Additional information relating to Clauses 1 to 7.....	19
Annex B (informative) Uncertainty considerations	24
Bibliography.....	29
Figure 1 – Measurement system for $\tan \delta$ of the sapphire rod	9
Figure 2 – Measurement system for the microwave power dependence of the surface resistance	9

Figure 3 – Sapphire resonator (open type) to measure the surface resistance of superconductor films	10
Figure 4 – Reflection scattering parameters ($ S_{11} $ and $ S_{22} $)	13
Figure 5 – Term definitions in Table 3	17
Figure A.1 – Three types of sapphire rod resonators	19
Figure A.2 – Mode chart for a sapphire resonator (see IEC 61788-15)	20
Figure A.3 – Loaded quality factor Q_L measurements using the conventional 3 dB method and the circle fit method	21
Figure A.4 – Temperature dependence of $\tan \delta$ of a sapphire rod measured using the two-resonance mode dielectric resonator method [3]	22
Figure A.5 – Dependence of the surface resistance R_s on the maximum surface magnetic flux density $B_{s \max}$ [3]	23
Table 1 – Typical dimensions of the sapphire rod	11
Table 2 – Specifications of the vector network analyzer	16
Table 3 – Specifications of the sapphire rods	17
Table B.1 – Output signals from two nominally identical extensometers	25
Table B.2 – Mean values of two output signals	25
Table B.3 – Experimental standard deviations of two output signals	25
Table B.4 – Standard uncertainties of two output signals	26
Table B.5 – Coefficient of Variations of two output signals	26

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-16:2013

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SUPERCONDUCTIVITY –**Part 16: Electronic characteristic measurements –
Power-dependent surface resistance
of superconductors at microwave frequencies**

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 61788-16 has been prepared by IEC technical committee 90: Superconductivity.

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

FDIS	Report on voting
90/309/FDIS	90/318/RVD

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

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

A list of all the parts in the IEC 61788 series, published under the general title *Superconductivity*, can be found on the IEC website.

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

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

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 61788-16:2013

INTRODUCTION

Since the discovery of high- T_c superconductors (HTS), extensive researches have been performed worldwide for electronic applications and large-scale applications.

In the fields of electronics, especially in telecommunications, microwave passive devices such as filters using HTS are being developed and testing is underway on sites [1,2,3,4]¹.

Superconductor materials for microwave resonators, filters, antennas and delay lines have the advantage of ultra-low loss characteristics. Knowledge of this parameter is vital for the development of new materials on the supplier side and the design of superconductor microwave components on the customer side. The parameters of superconductor materials needed to design microwave components are the surface resistance R_s and the temperature dependence of the R_s . Recent advances in HTS thin films with R_s , several orders of magnitude lower than normal metals has increased the need for a reliable characterization technique to measure this property [5,6]. Among several methods to measure the R_s of superconductor materials at microwave frequencies, the dielectric resonator method [7,8,9] has been useful due to that the method enables to measure the R_s nondestructively and accurately. In particular, the sapphire resonator is an excellent tool for measuring the R_s of HTS materials [10]. In 2002, the International Electrotechnical Commission (IEC) published the dielectric resonator method as a measurement standard [11].

The test method given in this standard enables measurement of the power-dependent surface resistance of superconductors at microwave frequencies. For high power microwave device applications such as those of transmitting devices, not only the temperature dependence of R_s but also the power dependence of R_s is needed to design the microwave components. Based on the measured power dependence, the RF current density dependence of the surface resistance can be evaluated. The simulation software to design the device gives the RF current distribution in the device. The results of the power dependence measurement can be directly compared with the simulation and allow the power handling capability of the device to be evaluated.

The test method given in this standard can be also applied to other superconductor bulk plates including low- T_c material.

This standard is intended to give an appropriate and agreeable technical base for the time being to those engineers working in the fields of electronics and superconductivity technology.

The test method covered in this standard is based on the VAMAS (Versailles Project on Advanced Materials and Standards) pre-standardization work on the thin film properties of superconductors.

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

SUPERCONDUCTIVITY –

Part 16: Electronic characteristic measurements – Power-dependent surface resistance of superconductors at microwave frequencies

1 Scope

This part of IEC 61788 involves describing the standard measurement method of power-dependent surface resistance of superconductors at microwave frequencies by the sapphire resonator method. The measuring item is the power dependence of R_s at the resonant frequency.

The following is the applicable measuring range of surface resistances for this method:

Frequency: $f \sim 10$ GHz

Input microwave power: $P_{in} < 37$ dBm (5 W)

The aim is to report the surface resistance data at the measured frequency and that scaled to 10 GHz using the $R_s \propto f^2$ relation for comparison.

2 Normative references

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

IEC 60050 (all parts), *International Electrotechnical Vocabulary* (available at: <http://www.electropedia.com>)

IEC 61788-15, *Superconductivity – Part 15: Electronic characteristic measurements – Intrinsic surface impedance of superconductor films at microwave frequencies*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the definitions given in IEC 60050-815, one of which is repeated here for convenience, apply.

3.1 surface impedance

impedance of a material for a high frequency electromagnetic wave which is constrained to the surface of the material in the case of metals and superconductors

Note 1 to entry: The surface impedance governs the thermal losses of superconducting RF cavities.

Note 2 to entry: In general, surface impedance Z_s for conductors including superconductors is defined as the ratio of the electric field E_t to the magnetic field H_t , tangential to a conductor surface:

$$Z_s = E_t / H_t = R_s + jX_s,$$

where R_s is the surface resistance and X_s is the surface reactance.

4 Requirements

The surface resistance R_s of a superconductor film shall be measured by applying a microwave signal to a sapphire resonator with the superconductor film specimen and then measuring the insertion attenuation of the resonator at each frequency. The frequency shall be swept around the resonant frequency as the center and the insertion attenuation - frequency characteristics shall be recorded to obtain the Q-value, which corresponds to the loss.

The target relative combined standard uncertainty of this method is the coefficient of variation (standard deviation divided by the average of the surface resistance determinations), which is less than 20 % for a measurement temperature range from 30 K to 80 K.

It is the responsibility of the user of this standard to consult and establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

Hazards exist in such measurement. The use of a cryogenic system is essential to cool the superconductors and allow transition into the superconducting state. Direct contact of skin with cold apparatus components can cause immediate freezing, as can direct contact with a spilled cryogen. The use of an RF-generator is also essential to measure the high-frequency properties of materials. If its power is excessive, direct contact to human bodies could cause immediate burns.

5 Apparatus

5.1 Measurement system

5.1.1 Measurement system for the $\tan \delta$ of the sapphire rod

Figure 1 shows a schematic diagram of the system required for the $\tan \delta$ measurement. The system consists of a network analyzer system for transmission measurements, a measurement apparatus in which a sapphire resonator with superconductor films is fixed, and a thermometer for monitoring the measuring temperature.

The incident power generated from a suitable microwave source such as a synthesized sweeper is applied to the sapphire resonator fixed in the measurement apparatus. The transmission characteristics are shown on the display of the network analyzer. The measurement apparatus is fixed in a temperature-controlled cryocooler.

To measure the $\tan \delta$ of the sapphire rod, a vector network analyzer is recommended, since its measurement accuracy is superior to a scalar network analyzer due to its wide dynamic range.

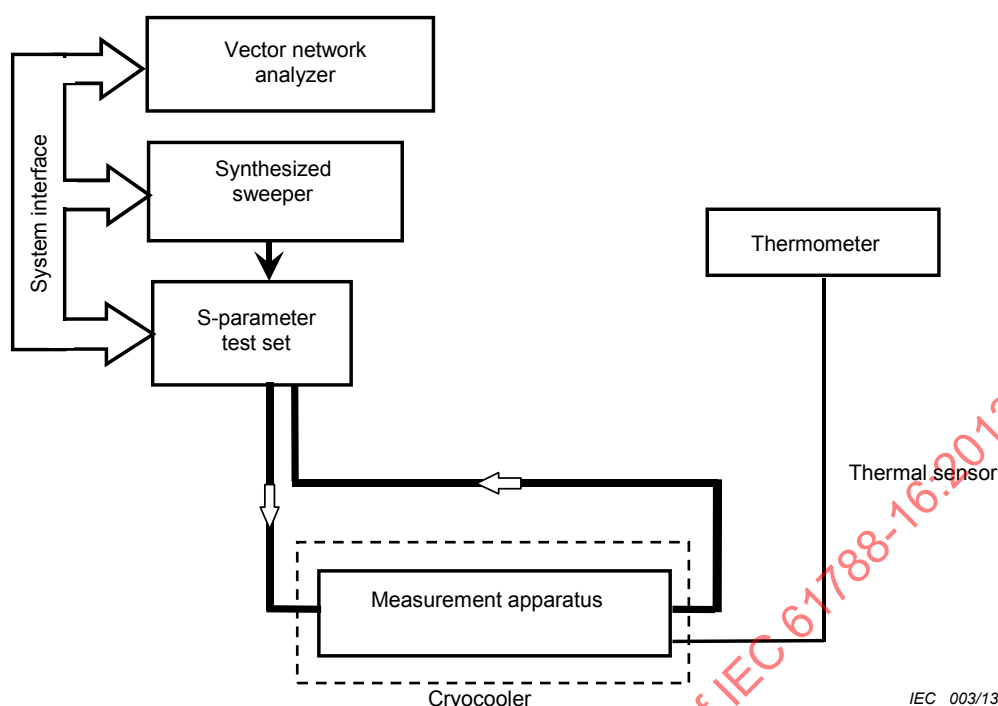


Figure 1 – Measurement system for $\tan \delta$ of the sapphire rod

5.1.2 Measurement system for the power dependence of the surface resistance of superconductors at microwave frequencies

Figure 2 shows the measurement system for the power dependence of the surface resistance of superconductors using a sapphire resonator. A travelling wave tube (TWT) power amplifier with a maximum output power of around 40 dBm is inserted at the input into the resonator. The maximum input power into the resonator is around 37 dBm in this measurement system shown in Figure 2. The typical maximum input power of a network analyzer is in the order of 0 dBm, so a measurement circuit shall be designed to avoid direct exposure of high powered microwaves to the network analyzer, and also by using a circulator and an attenuator, significant reflection from the sapphire resonator should not affect the TWT amplifier.

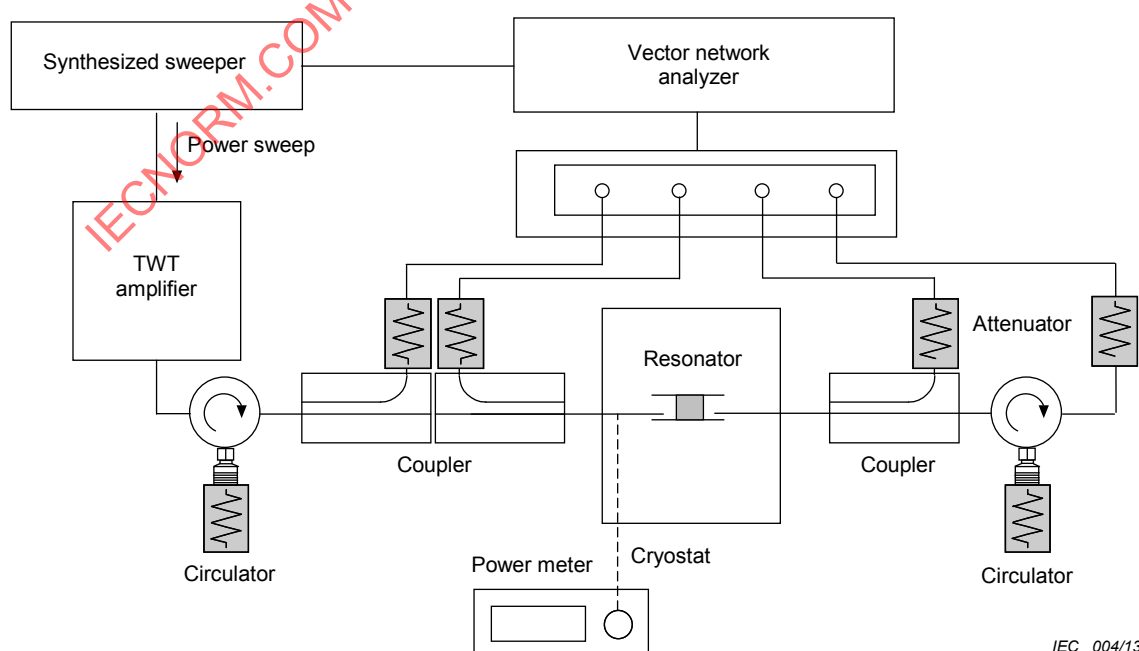


Figure 2 – Measurement system for the microwave power dependence of the surface resistance

Incident microwave power to the resonator is calibrated using a power meter before the measurement (dotted line in Figure 2). The incident power of the microwave is swept by changing the input power of the TWT amplifier.

5.2 Measurement apparatus

5.2.1 Sapphire resonator

Figure 3 shows a schematic diagram of a typical sapphire resonator (open type resonator) used to measure R_s of superconductor films and $\tan \delta$ of the sapphire rod [9]. In the sapphire resonator, a sapphire rod was sandwiched between two superconducting films. The upper superconductor film is pressed down by a spring, which is made of phosphor bronze. The use of a plate type spring is recommended to improve measurement accuracy. This type of spring reduces the friction between the spring and the rest of the apparatus, and facilitates the movement of superconductor films during the thermal expansion of the sapphire rod.

Two semi-rigid cables for measuring transmission characteristics of the resonator shall be attached on both sides of the resonator in axially symmetrical positions ($\phi = 0$ and π , where ϕ is the rotational angle around the central axis of the sapphire rod). A semi-rigid cable with an outer diameter of 3,50 mm is recommended. Each of the two semi-rigid cables shall have a small loop at the end. The plane of the loop shall be set parallel to that of the superconductor films in order to suppress the unwanted TM_{mn0} modes. The coupling loops shall be carefully checked for cracks in the spot weld joint that may have developed upon repeated thermal cycling. These cables can move right and left to adjust the insertion attenuation (IA). In this adjustment, coupling of unwanted modes to the interested resonance mode shall be suppressed. Unwanted coupling to the other modes reduces the high Q value of the TE mode resonator. To suppress the unwanted coupling, special attention shall be paid to designing high Q resonators. Two other types of resonators usable along with the open type shown in Figure 3 are explained in A.1.

A reference line made of a semi-rigid cable shall be used to measure the full transmission power level, i.e. the reference level. The cable length equals to the sum of the two cables of the measurement apparatus.

To minimize the measurement error, two superconductor films shall be set in parallel. To ensure that the two superconductor films remain in tight contact with the ends of the sapphire rod, without any air gap, the surface of the two films and both ends of the rod shall be cleaned carefully.

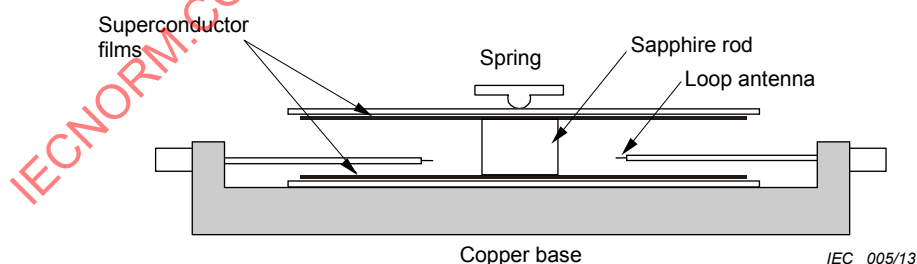


Figure 3 – Sapphire resonator (open type) to measure the surface resistance of superconductor films

5.2.2 Sapphire rod

A high-quality sapphire rod with low $\tan \delta$ is required to achieve the requisite measurement accuracy on R_s . A recommended sapphire rod is expected to have a $\tan \delta$ less than 10^{-6} at 77 K. To minimize the measurement error in R_s of the superconductor films, both ends of the sapphire rods shall be polished parallel to each other and perpendicular to the axis. Specifications of the sapphire rods are described in 7.1.

The diameter and height of the sapphire rod shall be carefully designed to ensure the TE_{011} , TE_{021} and TE_{012} modes do not couple to other TM, HE and EH modes, since coupling between TE mode and other modes causes the unloaded Q to deteriorate. The design guideline for the sapphire rod is described in A.2. Table 1 shows typical dimensions of the sapphire rod for a TE_{011} -mode resonant frequency of about 10 GHz.

Table 1 – Typical dimensions of the sapphire rod

Resonance Mode	Frequency GHz	Diameter	Height
		d mm	h mm
TE_{011}	10,6	11,8	6,74
TE_{021}	17,0		
TE_{012}	17,0		

5.2.3 Superconductor films

The diameter of the superconductor films shall be about three times larger than that of the sapphire rods. In this configuration, the increased uncertainty of R_s due to the radiation loss can be considered negligible, given the target relative combined standard uncertainty of 20%.

The film thickness shall be more than three times larger than the London penetration depth value at each temperature. If the film thickness is less than three times the London penetration depth, the measured R_s should mean the effective surface resistance.

6 Measurement procedure

6.1 Set-up

All the components of the sapphire resonator, such as the sapphire rod, superconductor films, and so on, shall be kept in a clean and dry state such as in a dry box or desiccator, as high humidity may degrade the unloaded Q -value.

The sapphire resonator shall be fixed in a specimen chamber inside the temperature-controlled cryocooler. The specimen chamber shall be generally evacuated. The temperatures of the superconductor films and sapphire rod shall be measured by a diode thermometer, or a thermocouple. The temperatures of the upper and lower superconductor films, and the sapphire rod must be kept as close as possible. This can be achieved by covering the sapphire resonator with aluminum foil, or filling the specimen chamber with helium gas.

6.2 Measurement of the $\tan \delta$ of the sapphire rod

6.2.1 General

To measure the surface resistance of the superconductor films precisely using a sapphire resonator, the $\tan \delta$ of the sapphire rod shall be known. The two-resonance mode dielectric resonator method [12,13], which uses the TE_{021} and TE_{012} modes of the same sapphire resonator shall be adopted to measure the $\tan \delta$ of the sapphire rod. The measurement procedure of the $\tan \delta$ is as follows:

6.2.2 Measurement of the frequency response of the TE_{021} mode

The temperature dependence of the resonant frequency f_0 and unloaded quality factor Q_u for TE_{021} resonance mode shall be measured as follows:

- a) Connect the measurement system as shown in Figure 1. Fix the distance between the sapphire rod and each of the loops of the semi-rigid cables to be equal, so that this transmission-type resonator can be under-coupled equally to both loops. The coupling shall be adjusted to be weak enough not to excite unwanted resonance modes such as TM, HE and EH modes but strong enough to be able to excite TE₀₂₁ mode. The input power to the resonator shall be below 10 dBm (typically 0 dBm). Confirm that the insertion attenuation of this mode is larger than 20 dB from the reference level. Evacuate and cool down the specimen chamber to below the critical temperature.
- b) Measure S_{21} as a function of frequency where S_{21} is the transmission scattering parameter. Find the TE₀₂₁ mode $|S_{21}|$ resonance peak of this resonator at a frequency nearly equal to the designed value of the resonant frequency f_0 .
- c) Narrow the frequency span on the display so that only the $|S_{21}|$ resonance peak of TE₀₂₁ mode can be shown.
- d) Collect both real and imaginary parts of the S_{21} , S_{11} and S_{22} as a function of frequency ($S_{21}(f)$, $S_{11}(f)$ and $S_{22}(f)$) where S_{11} and S_{22} are reflection scattering parameters.
- e) Resonant frequency f_0 and loaded Q-value Q_L are obtained by fitting the experimentally measured data $S_{21}(f)$ to the Equation (1), where f_0 and Q_L are fitting parameters.

$$S_{21}(f) = \frac{S_{21}(f_0)}{1 + jQ_L \Delta(f)} \quad (1)$$

where f is frequency and $\Delta(f)$ is defined as

$$\Delta(f) = 1 - \frac{f_0^2}{f^2} \quad (2)$$

This fitting technique is called the “Circle fit technique”, the details of which are described in A.3.

- f) The unloaded Q-value, Q_U , shall be extracted from the Q_L by the following Equation (3):

$$Q_U = Q_L (1 + \beta_1 + \beta_2) \quad (3)$$

where β_1 and β_2 are the coupling coefficients and defined as

$$\beta_1 = \frac{1 - |S_{11}|}{|S_{11}| + |S_{22}|} \quad (4)$$

$$\beta_2 = \frac{1 - |S_{22}|}{|S_{11}| + |S_{22}|} \quad (5)$$

where $|S_{11}|$ and $|S_{22}|$ are dips in the reflection scattering parameters at f_0 as shown in Figure 4, and measured in linear units of power rather than relative dB.

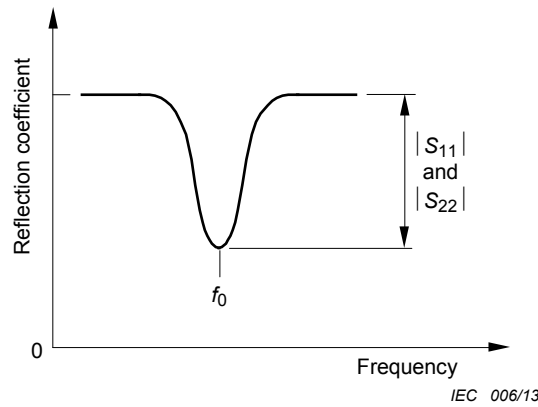


Figure 4 – Reflection scattering parameters ($|S_{11}|$ and $|S_{22}|$)

- g) The f_0 and Q_U measured for this TE_{021} mode are denoted as f_{021} and Q_{U021} . By slowly changing the temperature of the cryocooler, the temperature dependence of f_{021} and Q_{U021} shall be measured.

6.2.3 Measurement of the frequency response of the TE_{012} mode

The temperature dependence of the resonant frequency f_0 and unloaded quality factor Q_U for the TE_{012} resonance mode shall be measured similarly to the TE_{021} resonance mode. The procedure is as follows:

- After measuring the TE_{021} mode, cool down the specimen chamber below the critical temperature again.
- Measure S_{21} as a function of frequency. Find the TE_{012} mode $|S_{21}|$ resonance peak of this resonator at a frequency nearly equal to the designed value of the resonant frequency f_0 .
- Narrow the frequency span on the display so that only the $|S_{21}|$ resonance peak of TE_{012} mode can be shown.
- Follow step 6.2.2 d) to g) to measure the temperature dependence of the resonant frequency f_0 and the unloaded Q value Q_U for this TE_{012} mode. They are denoted as f_{012} and Q_{U012} .

6.2.4 Determination of $\tan \delta$ of the sapphire rod

Using the measured value of f_{021} , Q_{U021} , f_{012} and Q_{U012} , the surface resistance of the superconductor films R_s and $\tan \delta$ of the sapphire rod are given by the following simultaneous equations:

$$\left. \begin{aligned} R_s(f_{012}) &= \frac{1}{B_{012}} \left\{ \frac{A_{012}}{Q_{U012}} - \tan \delta(f_{012}) \right\} \\ R_s(f_{021}) &= \frac{1}{B_{021}} \left\{ \frac{A_{021}}{Q_{U021}} - \tan \delta(f_{021}) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

where A_{012} , B_{012} , A_{021} and B_{021} are geometric factors of TE_{012} and TE_{021} , respectively, and given by

$$A = 1 + \frac{W}{\epsilon'} \quad (7)$$

$$B = p^2 \left(\frac{\lambda_0}{2h} \right)^3 \frac{1+W}{30\pi^2 \epsilon'}, \quad p = 1, 2, \dots, \quad (8)$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} \quad (9)$$

$$W = \frac{J_1^2(u) K_0(v) K_2(v) - K_1^2(v)}{K_1^2(v) J_1^2(u) - J_0(u) J_2(u)} \quad (10)$$

$$v^2 = \left(\frac{\pi d}{\lambda_0} \right)^2 \left[\left(\frac{p \lambda_0}{2h} \right)^2 - 1 \right] \quad (11)$$

$$u \frac{J_0(u)}{J_1(u)} = -v \frac{K_0(v)}{K_1(v)} \quad (12)$$

where,

λ_0 is the free space resonant wavelength;

c is the velocity of light in a vacuum ($c = 2,9979 \times 10^8$ m/s);

h is the height of the sapphire rod, and d is the diameter of the sapphire rod.

In the equations, $f_0 = f_{012}$ and $p = 2$ for TE_{012} mode, and $f_0 = f_{021}$ and $p = 1$ for TE_{021} mode, respectively.

The value u^2 is given by the transcendental Equation (12) using the value of v^2 , where $J_n(u)$ is the Bessel function of the first kind and $K_n(v)$ is the modified Bessel function of the second kind, respectively. For any value of v , the m -th solution u exists between u_{0m} and u_{1m} , where $J_0(u_{0m}) = 0$ and $J_1(u_{1m}) = 0$. $m = 1$ for TE_{012} mode and $m = 2$ for TE_{021} mode.

In Equation (8), both R_s and $\tan \delta$ are frequency-dependent and the scaling relations $R_s \propto f^2$ as explained by the two-fluid model, and $\tan \delta \propto f$ an assumed relation for low-loss dielectrics, can be applied.

$$R_s(f_{021}) = R_s(f_{012}) \times (f_{021} / f_{012})^2 \quad (13)$$

$$\tan \delta(f_{021}) = \tan \delta(f_{012}) \times (f_{021} / f_{012}) \quad (14)$$

In Equations (7) and (8), ε' is the relative permittivity of the sapphire rod and given by

$$\varepsilon' = \left(\frac{\lambda_0}{\pi d} \right)^2 (u^2 + v^2) + 1 \quad (15)$$

using the values of v^2 and u^2 .

6.3 Power dependence measurement

6.3.1 General

Once the $\tan \delta$ of the sapphire rod has been measured, the surface resistance and its power dependence can be evaluated using the single resonance mode. TE_{011} is suitable for this measurement because of the strong resonance peak. The experimental procedure for the power dependence measurements is as follows.

6.3.2 Calibration of the incident microwave power to the resonator

The incident microwave power to the resonator shall be calibrated using a power meter before the measurement (dotted line in Figure 2). The incident power to the resonator, P_{in} , was determined as the measured power at the input of the resonator.

6.3.3 Measurement of the reference level

The level of full transmission power (reference level) shall be measured first. Connect the reference line of the semi-rigid cable between the input and output connectors. Subsequently, measure the transmission power level over the entire measurement frequency and temperature range. The reference level can change several decibels when the temperature of the apparatus changes from room temperature to the lowest measurement temperature. Therefore, the temperature dependence of the reference level must be taken into account.

6.3.4 Surface resistance measurement as a function of the incident microwave power

- Connect the measurement system as shown in Figure 2. Fix the distance between the sapphire rod and the loops of the semi-rigid cables using a strong coupling, so that high microwave power can be introduced into the resonator. A suitable coupling strength is $|S_{11}| \cong 3$ dB. Cool down the specimen chamber to below the critical temperature.
- Measure S_{21} as a function of frequency. Find the TE_{011} mode $|S_{21}|$ resonance peak of this resonator at a frequency nearly equal to the designed value of the resonant frequency f_0 .
- Narrow the frequency span on the display so that only the $|S_{21}|$ resonance peak of TE_{011} mode can be shown. Measure the insertion attenuation, a_{ins} , which is the attenuation (in dB) from the reference level to the $|S_{21}|$ at the resonant frequency f_0 of the TE_{011} mode.
- Collect both real and imaginary parts of the S_{21} and S_{11} as a function of frequency ($S_{21}(f)$ and $S_{11}(f)$).
- Follow the step 6.2.2 e) to measure the resonant frequency f_0 and the loaded Q value Q_L for this TE_{011} mode. They are denoted as f_{011} and Q_{L011} .
- Extract the unloaded Q value, Q_{U011} , from the Q_{L011} by the following equation:

$$Q_{U011} = \frac{Q_{L011}}{1 - A_t}, A_t = 10^{-a_{ins}/20} \quad (16)$$

- The surface resistances of the superconductor films are obtained by the following equation:

$$R_s(f_{011}) = \frac{1}{B_{011}} \left\{ \frac{A_{011}}{Q_{U011}} - \tan \delta(f_{011}) \right\} \quad (17)$$

where A_{011} and B_{011} are geometric factors of TE_{011} mode, and obtained by equations (7) to (15) setting $f_0 = f_{011}$, $p = 1$, and $m = 1$. The $\tan \delta(f_{011})$ should be the scaled value at f_{011} of the value determined in 6.2.4 which corresponds to f_{012} ,

$$\tan \delta(f_{011}) = \tan \delta(f_{012}) \times (f_{011} / f_{012}) \quad (18)$$

- The incident power of the microwave was swept by changing the input power of the TWT amplifier with the specimen chamber maintained at a constant temperature. Repeat steps c) to g) for each incident microwave power.
- Change the temperature of the specimen chamber and repeat steps c) to h) for each temperature.

6.3.5 Determination of the maximum surface magnetic flux density

The measured incident microwave power dependence of the surface resistance itself does not directly show the power handling capability of the superconductor films. The latter shall be measured in terms of the maximum surface magnetic flux density without causing its properties to deteriorate. High surface magnetic flux density, i.e., RF current induces the pair breaking of

the Cooper pair and increases the surface resistance. Also weak coupling between the grain boundaries or d-wave symmetry of the superconductor is considered to increase the surface resistance.

From the measured incident power dependence of the surface resistance, the maximum surface magnetic flux density shall be calculated as follows [14,15].

The dissipated power in the resonator P_0 is evaluated from the incident power to the resonator P_{in} and S parameters as follows:

$$P_0 = P_{in}(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2) \quad (19)$$

The surface magnetic flux density of the superconducting films can be calculated by the analytical equation. The maximum surface magnetic flux density $B_{s \max}$ is given by the following equation [14]:

$$B_{s \max} = 0,581865 \left\{ \frac{2\pi R_s}{P_0} \int_0^{d/2} J_1^2 \left(\frac{2u}{d} \rho \right) \rho d\rho \left[1 + W + \frac{240\pi^2 \varepsilon' \tan \delta}{R_s} \left(\frac{h}{\lambda_0} \right)^3 \right] \right\}^{-1/2} \quad (20)$$

where d , J_1 , u , W , ε' , h and λ_0 are the same as defined in Equations (7) to (15), and λ_d is the penetration depth of the superconductor films. The λ_d can be directly measured according to IEC 61788-15. When the directly measured λ_d data is not available, a typical reported value for the same material should be used.

7 Uncertainty of the test method

7.1 Surface resistance

A vector network analyzer as specified in Table 2 shall be used to record the frequency dependence of attenuation. The resulting record shall allow the determination of Q to a relative uncertainty of 10^{-2} .

Table 2 – Specifications of the vector network analyzer

Dynamic range of S_{21}	above 60 dB
Frequency resolution	below 1 Hz
Attenuation uncertainty	below 0,1 dB
Input power limitation	below 10 dBm

The specifications of the sapphire rod are shown in Table 3. Term definitions in Table 3 are shown in Figure 5.

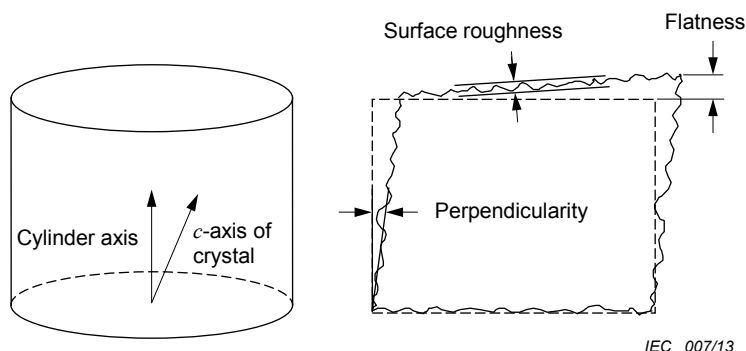


Figure 5 – Term definitions in Table 3

Table 3 – Specifications of the sapphire rods

Tolerance in diameter	$\pm 0,05$ mm
Tolerance in height	$\pm 0,05$ mm
Flatness	below 0,005 mm
Surface roughness	top and bottom surface: root mean square height below 10 nm cylindrical surface: root mean square height below 0,001 mm
Perpendicularity	within $0,1^\circ$
Axis	parallel to c-axis within $0,3^\circ$

7.2 Temperature

The measurement apparatus is cooled down to the specified temperature by any means during testing. An easy choice would be to immerse the apparatus into a liquid cryogen. This technique is quick and simple and yields a known and stable temperature. Unfortunately, most HTS materials are damaged by the condensation of moisture that occurs when removing the sample from the cryogen. In addition, uncertainties generated by the presence of a gas/liquid mixture within the cavity, and the inability to measure R_s as a function of temperature support the use of other cooling methods. These limitations can be circumvented by the immersion of a vacuum can into a liquid cryogen. If the vacuum can is backfilled with gas, then rapid cooling and uniform temperatures occur. If heaters are attached to the apparatus, then the temperature-dependent properties of the HTS material can be measured. A third and equally good choice is the use of a cryocooler. In this case, the resonator is under vacuum and cooled by conduction through the metallic package. Care must be taken to avoid temperature gradients with the apparatus.

A cryostat shall be provided with the necessary environment for measuring R_s and the specimen shall be measured while in a stable and isothermal state. The specimen temperature is assumed to be the same as that of the sample holder. The holder temperature shall be reported to an accuracy of ± 2 K, measured using an appropriate temperature sensor.

The difference between the specimen and holder temperatures shall be minimized by using shields with good thermal conductivity.

For power dependence measurement, heating of the loop antenna by elevated microwave power level may affect the measurements. To minimize the heating effects, the distance between the sapphire rod and the loops of the semi-rigid cables should be short enough to realize a strong coupling and to reduce the incident microwave power level for the power measurement. A suitable coupling strength is $|S_{11}| \cong 3$ dB, as shown in 6.3.4 a).

7.3 Specimen and holder support structure

The support structure shall provide adequate support for the specimen. It is imperative that the two films be parallel and mechanically stable throughout the measurement, especially in a cryocooler and over a wide temperature range.

7.4 Specimen protection

Condensation of moisture and scratching of the film deteriorate superconducting properties. Some protection measures should be provided for the specimens. Polytetrafluoroethylene (PTFE) or Polymethylmethacrylate (PMMA) coating does not affect the measurements, thus they can be used for protection [16]. A coating material thickness of less than several micrometers is recommended.

8 Test report

8.1 Identification of the test specimen

The test specimen shall be identified, if possible, by the following:

- a) name of the manufacturer of the specimen;
- b) classification and/or symbol;
- c) lot number;
- d) chemical compositions of the thin film and substrate;
- e) thickness and roughness of the thin film;
- f) manufacturing process technique.

8.2 Report of power dependence of R_s values

The R_s values, along with their corresponding f_{011} , Q_u , ε' , $\tan \delta$, P_{in} values, and their maximum surface magnetic flux density ($B_{s\ max}$) dependence shall be reported.

8.3 Report of test conditions

The following test conditions shall be reported:

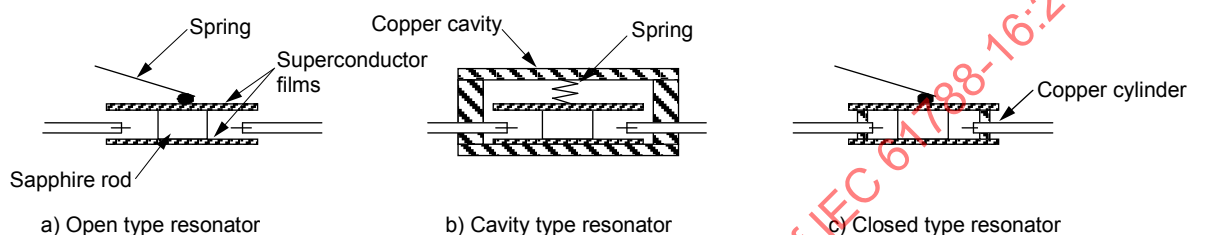
- a) test frequency and resolution of frequency;
- b) test maximum RF incident power;
- c) test temperature, uncertainty of temperature and temperature difference of two plates;
- d) history of sample temperature versus time.

Annex A (informative)

Additional information relating to Clauses 1 to 7

A.1 Three types of sapphire rod resonators

Unwanted parasitic coupling to the other mode reduces the high Q-value of the TE mode resonator. To suppress the parasitic coupling, special attention is paid to design high Q resonators. Three types of resonators are proposed and shown in Figure A.1:



IEC 008/13

Figure A.1 – Three types of sapphire rod resonators

- a) Open type resonator: a low loss sapphire rod is placed between two parallel superconductor films. Two semi-rigid cables for the RF input and output magnetic dipole coupling are attached on both sides of the resonator. In this configuration, the vertical position of the coupling cables should be carefully designed so as to prevent the radiation loss from propagating along the coupling cables, which degrades the high Q of the TE_{0mp} mode and causes increased error for the R_s measurements.
- b) Cavity type resonator: the open type resonator shown in a) is placed inside a conductor (copper) cavity.
- c) Closed type resonator: a conductor (copper) cylinder is put between the superconductor films. In this configuration, the radiation loss along the coupling cable is strongly blocked by the copper cylinder.

The measuring apparatus on the cryocooler is protected from mechanical and thermal disturbances, e.g. by using vibration absorbers and/or by covering the apparatus with radiation shield, and installed in an X-Y and/or Z-axial manipulator for adjusting sample positions within the range of approximately ± 1 mm.

A loop length of the antenna is designed on the basis of the quarter wavelength rule to achieve the maximum measuring sensitivity.

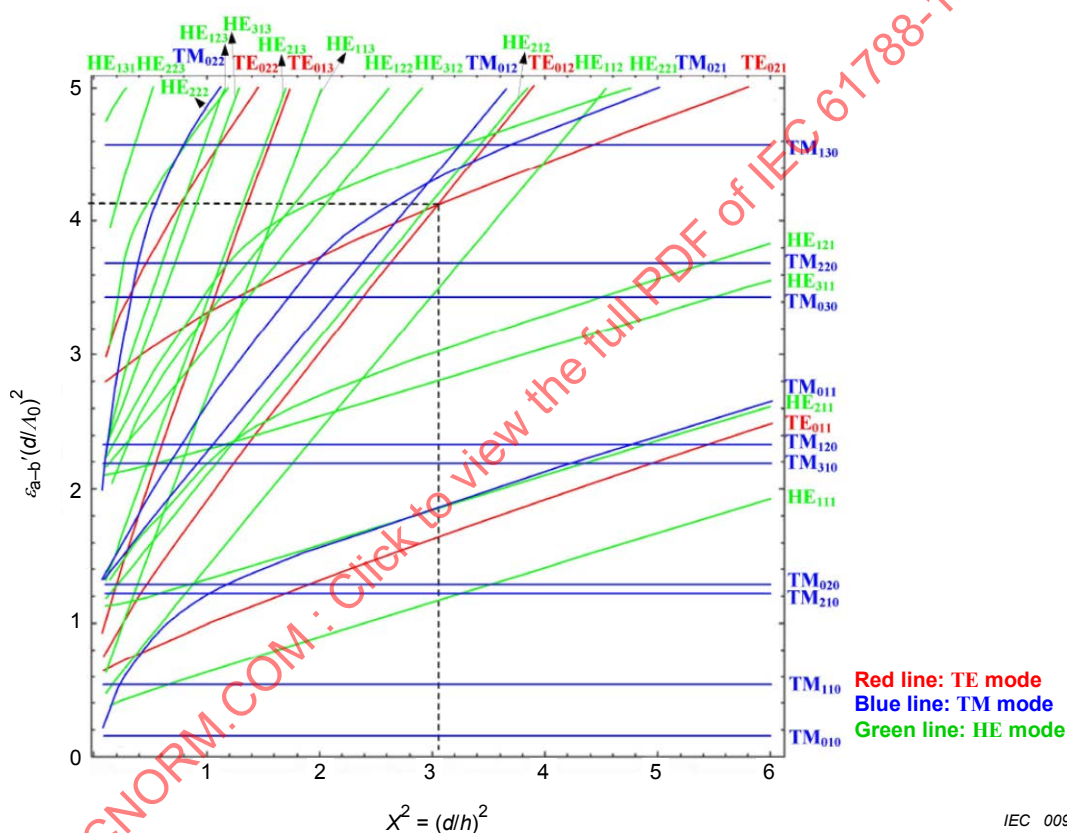
A.2 Dimensions of the sapphire rod

The two-resonance mode dielectric resonator method used in this standard uses a single sapphire resonator that differs from the existing IEC standard (IEC 61788-7:2006) which uses two sapphire resonators with nearly the same $\tan \delta$ quality. Use of a single sapphire resonator makes it possible to reduce uncertainty in the measured surface resistance that might result from using two sapphire resonators with sapphire rods of even slightly different quality.

The two-resonance mode dielectric resonator method uses the two modes of the same sapphire resonator, namely, TE_{012} and TE_{021} [1]². The sapphire rod is designed with these two modes located within a narrow frequency range, but not affecting each other. Also the coupling between these TE modes and other TM, HE and EH modes should be avoided.

Figure A.2 shows the mode charts for designing the sapphire resonator used for the two-resonance mode dielectric resonator method, in which the uniaxial-anisotropic characteristics of the relative permittivity of the sapphire rod are taken into consideration (see IEC 61788-15). ϵ_{a-b}' is the relative permittivity in the plane perpendicular to the c-axis, d is the diameter of the sapphire rod, h is the height of the sapphire rod, and λ_0 is the free space resonant wavelength.

As shown in Figure A.2, the value $(d/h)^2$ should be selected around 3,06 to ensure the TE_{012} and TE_{021} resonances are located close enough to each other and are not affected by the other modes.



NOTE The dotted line corresponds to the dimensions of the sapphire rod used for the two-resonance mode dielectric resonator method. λ_0 denotes the wavelength in free space corresponding to the resonant frequency f_0 and $\lambda_0 = c/f_0$ with $c = 2,9979 \times 10^8$ m/s. $\epsilon_{a-b}' = 9,28$ and $\epsilon_c' = 11,3$ are used in preparing this mode chart.

Figure A.2 – Mode chart for a sapphire resonator (see IEC 61788-15)

As the resonant frequency of TE mode is a function of relative permittivity and the dimensions of the sapphire rod, its diameter and height are selected so that the desired f_0 is obtained.

From the curve of the TE_{012} mode in Figure A.2, the value of $\epsilon_{a-b}'(d/\lambda_0)^2$ can be determined for each $(d/h)^2$ value. When the value $(d/h)^2$ equals 3,06, for example, the value of $\epsilon_{a-b}'(d/\lambda_0)^2$ equals 4,15. Thus, the resonant frequency of TE_{012} mode for the sapphire rod with dimension of

² Figures in square brackets refer to the reference documents in A.5 of this annex.

$(d/h)^2 = 3,06$ is calculated from the following equation by specifying d and ε_{a-b}' of the sapphire rod:

$$\varepsilon_{a-b}'(d/\lambda_0)^2 = \varepsilon_{a-b}'(d \times f_0/c)^2 = 4,15 \quad (\text{A.1})$$

For the two-resonance mode dielectric resonator measurement, the sapphire rod is designed to be 11,8 mm in diameter and 6,74 mm in height, and thus f_0 for either mode TE_{012} or TE_{021} is around 17 GHz. For the power-dependence measurement, f_0 for the TE_{011} mode is 10,6 GHz.

A.3 Circle fit technique

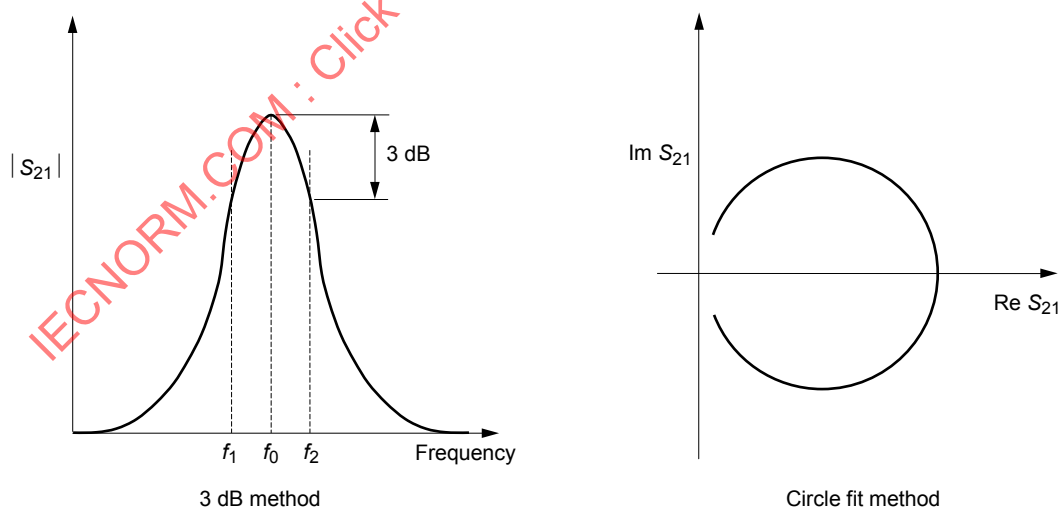
In principle, the accuracy of an R_s measurement and/or $\tan \delta$ measurement mainly depends on that of the quality factor measurement. The circle fit technique can precisely measure Q_L . Figure A.3 shows a schematic of two methods used for Q_L measurements, namely, the conventional 3 dB method and the circle fit method.

The 3 dB method is widely used due to its simplicity. In the 3 dB method, Q_L is given by

$$Q_L = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (\text{A.2})$$

where f_0 is the resonant frequency and Δf is the half power band width ($\Delta f = f_2 - f_1$).

Most vector network analyzers have an automatic function that measures Q_L by using the 3 dB method. However, this method uses only three points of the resonance peak and assumes an ideal symmetric resonance peak. Actual resonance peaks frequently exhibit asymmetric shapes due to the unwanted mode coupling effect. Moreover, when the coupling is very weak, measuring Q_L is difficult due to noise in the data.



IEC 010/13

Figure A.3 – Loaded quality factor Q_L measurements using the conventional 3 dB method and the circle fit method

The circle fit technique [2] is suitable for Q_L measurement when the resonance has an unwanted mode or very weak couplings. Figure A.3 shows the circle in the complex plane of S_{21} . For a simple equivalent circuit for the resonator, S_{21} can be defined as

$$S_{21}(f) = \frac{S_{21}(f_0)}{1 + jQ_L \Delta(f)} \quad (\text{A.3})$$

where f is frequency, f_0 is resonance frequency, and $\Delta(f)$ is defined as

$$\Delta(f) = 1 - \frac{f_0^2}{f^2} \quad (\text{A.4})$$

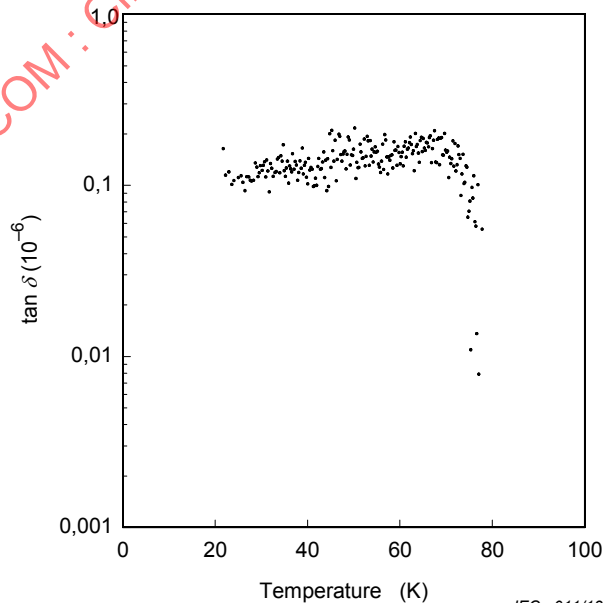
For numerical calculations, it is convenient to plot the f dependence of phase of S_{21} , $\phi_{21}(f)$:

$$\phi_{21}(f) = -\tan^{-1}(Q_L \Delta(f)) \quad (\text{A.5})$$

Q_L is calculated as the constant of Equation A.5. A proper frequency range for the fitting is nearly equal to that for the 3 dB method (from around f_1 to f_2). Using these fitting processes, many data points of f dependence of S_{21} are used, significantly improving measurement accuracy, especially when the resonance peak is very weak. Moreover, the circle fitting technique uses data in the complex plane and can exclude the effect of unwanted mode coupling.

A.4 Test results

Figure A.4 shows the measured $\tan \delta$ of a sapphire rod designed for the two-resonance mode dielectric resonator method. Data was measured at 17 GHz and scaled to 10,7 GHz. The $\tan \delta$ was in the order of 10^{-7} , and showed a slight increase with increasing temperature. The subsequent rapid decrease in $\tan \delta$ was due to the ambiguity of the measured Q_U near T_c caused by the rapid change in Q_U . In the two-resonance mode dielectric resonator measurement, the temperature of the resonator must be scanned twice, and the resulting small difference in these two temperatures and consequently in the Q_U measurement has a significant effect near T_c . The rapid decrease in $\tan \delta$ is not essential and does not reflect an intrinsic loss in the sapphire rod.



IEC 011/13

Figure A.4 – Temperature dependence of $\tan \delta$ of a sapphire rod measured using the two-resonance mode dielectric resonator method [3]

Figure A.5 shows the maximum surface magnetic flux density dependence of R_s calculated from the measured input-power dependence of Q_u for two commercial YBCO films on MgO(100) substrates as an example.

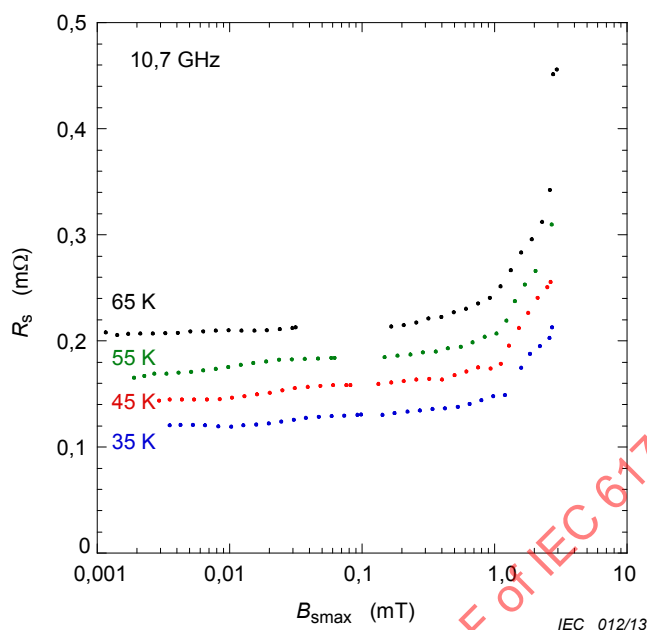


Figure A.5 – Dependence of the surface resistance R_s on the maximum surface magnetic flux density $B_{s \max}$ [3]

A.5 Reference documents

- [1] HASHIMOTO, T. and KOBAYASHI, Y. An image-type dielectric resonator method to measure surface resistance of a high- T_c superconductor film. *IEICE Trans. Electron.*, 2004, E87C No. 5, p. 681.
- [2] LEONG, K. and MAZIERSKA, J. Accurate measurement of surface resistance of HTS films using a noble transmission mode Q-factor technique. *J. Superconductivity*, 2001, 14, No. 1, p. 93.
- [3] OBARA, H. and KOSAKA, S. Microwave power dependence measurement of surface resistance of superconducting films using a dielectric resonator method with circle fit and two-mode techniques. *IEICE Trans. Electron.*, 2006, E89C, No. 2, p. 125.

Annex B (informative)

Uncertainty considerations

B.1 Overview

In 1995, a number of international standards organizations, including IEC, decided to unify the use of statistical terms in their standards. It was decided to use the word “uncertainty” for all quantitative (associated with a number) statistical expressions and eliminate the quantitative use of “precision” and “accuracy.” The words “accuracy” and “precision” could still be used qualitatively. The terminology and methods of uncertainty evaluation are standardized in the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) [1]³.

It was left to each technical committee to decide if they were going to change existing and future standards to be consistent with the new unified approach. Such change is not easy and creates additional confusion, especially for those who are not familiar with statistics and the term uncertainty. At the June 2006 TC 90 meeting in Kyoto, it was decided to implement these changes in future standards.

Converting “accuracy” and “precision” numbers to the equivalent “uncertainty” numbers requires knowledge about the origins of the numbers. The coverage factor of the original number may have been 1, 2, 3, or some other number. A manufacturer’s specification that can sometimes be described by a rectangular distribution will lead to a conversion number of $1/\sqrt{3}$. The appropriate coverage factor was used when converting the original number to the equivalent standard uncertainty. The conversion process is not something that the user of the standard needs to address for compliance to TC 90 standards, it is only explained here to inform the user about how the numbers were changed in this process. The process of converting to uncertainty terminology does not alter the user’s need to evaluate their measurement uncertainty to determine if the criteria of the standard are met.

The procedures outlined in TC 90 measurement standards were designed to limit the uncertainty of any quantity that could influence the measurement, based on the Convener’s engineering judgment and propagation of error analysis. Where possible, the standards have simple limits for the influence of some quantities so that the user is not required to evaluate the uncertainty of such quantities. The overall uncertainty of a standard was then confirmed by an interlaboratory comparison.

B.2 Definitions

Statistical definitions can be found in three sources: the GUM, the International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (VIM)[2], and the NIST Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results (NIST)[3]. Not all statistical terms used in this standard are explicitly defined in the GUM. For example, the terms “relative standard uncertainty” and “relative combined standard uncertainty” are used in the GUM:2008 (5.1.6, Annex J), but they are not formally defined in the GUM (see [3]).

B.3 Consideration of the uncertainty concept

Statistical evaluations in the past frequently used the coefficient of variation (COV) which is the ratio of the standard deviation and the mean (N.B. the COV is often called the relative standard deviation). Such evaluations have been used to assess the precision of the measurements and

³ Figures in square brackets refer to the reference documents in B.5 of this annex.

give the closeness of repeated tests. The standard uncertainty (SU) depends more on the number of repeated tests and less on the mean than the COV and therefore in some cases gives a more realistic picture of the data scatter and test judgment. The example below shows a set of electronic drift and creep voltage measurements from two nominally identical extensometers using same signal conditioner and data acquisition system. The $n = 10$ data pairs are taken randomly from the spreadsheet of 32 000 cells. Here, extensometer number one (E_1) is at zero offset position whilst extensometer number two (E_2) is deflected to 1 mm. The output signals are in volts.

Table B.1 – Output signals from two nominally identical extensometers

Output signal V	
E_1	E_2
0,00122070	2,33459473
0,00061035	2,33428955
0,00152588	2,33428955
0,00122070	2,33459473
0,00152588	2,33459473
0,00122070	2,33398438
0,00152588	2,33428955
0,00091553	2,33428955
0,00091553	2,33459473
0,00122070	2,33459473

Table B.2 – Mean values of two output signals

Mean ($\bar{X}$) V	
E_1	E_2
0,00119019	2,33441162

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad [\text{V}] \quad (\text{B.1})$$

Table B.3 – Experimental standard deviations of two output signals

Experimental standard deviation (s) V	
E_1	E_2
0,00030348	0,000213381

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad [\text{V}] \quad (\text{B.2})$$

Table B.4 – Standard uncertainties of two output signals

Standard uncertainty (u) V	
E_1	E_2
0,00009597	0,00006748

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad [\text{V}] \quad (\text{B.3})$$

Table B.5 – Coefficient of Variations of two output signals

Coefficient of Variation (COV) %	
E_1	E_2
25,4982	0,0091

$$\text{COV} = \frac{s}{\bar{X}} \quad (\text{B.4})$$

The standard uncertainty is very similar for the two extensometer deflections. In contrast the coefficient of variation COV is nearly a factor of 2800 different between the two data sets. This shows the advantage of using the standard uncertainty which is independent of the mean value.

B.4 Uncertainty evaluation example for TC 90 standards

The observed value of a measurement does not usually coincide with the true value of the measurand. The observed value may be considered as an estimate of the true value. The uncertainty is part of the "measurement error" which is an intrinsic part of any measurement. The magnitude of the uncertainty is both a measure of the metrological quality of the measurements and improves the knowledge about the measurement procedure. The result of any physical measurement consists of two parts: an estimate of the true value of the measurand and the uncertainty of this "best" estimate. The GUM, within this context, is a guide for a transparent, standardized documentation of the measurement procedure. One can attempt to measure the true value by measuring "the best estimate" and using uncertainty evaluations which can be considered as two types: Type A uncertainties (repeated measurements in the laboratory in general expressed in the form of Gaussian distributions) and Type B uncertainties (previous experiments, literature data, manufacturer's information, etc. often provided in the form of rectangular distributions).

The calculation of uncertainty using the GUM procedure is illustrated in the following example:

- a) The user must derive in the first step a mathematical measurement model in the form of identified measurand as a function of all input quantities. A simple example of such model is given for the uncertainty of a force, F_{LC} measurement using a load cell:

$$F_{\text{LC}} = W + d_w + d_R + d_{\text{Re}}$$

where W , d_w , d_R , and d_{Re} represent the weight of standard as expected, the manufacturer's data, repeated checks of standard weight/day and the reproducibility of checks at different days, respectively.

Here the input quantities are: the measured weight of standard weights using different balances (Type A), manufacturer's data (Type B), repeated test results using the digital electronic system (Type B), and reproducibility of the final values measured on different days (Type B).

b) The user should identify the type of distribution for each input quantity (e.g. Gaussian distributions for Type A measurements and rectangular distributions for Type B measurements).

c) Evaluate the standard uncertainty of the Type A measurements,

$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}}$ where, s is the experimental standard deviation and n is the total number of measured data points.

d) Evaluate the standard uncertainties of the Type B measurements:

$u_B = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot d_w^2 + \dots}$ where, d_w is the range of rectangular distributed values

e) Calculate the combined standard uncertainty for the measurand by combining all the standard uncertainties using the expression:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

In this case, it has been assumed that there is no correlation between input quantities. If the model equation has terms with products or quotients, the combined standard uncertainty is evaluated using partial derivatives and the relationship becomes more complex due to the sensitivity coefficients [4, 5].

f) Optional - the combined standard uncertainty of the estimate of the referred measurand can be multiplied by a coverage factor (e. g. 1 for 68 % or 2 for 95 % or 3 for 99 %) to increase the probability that the measurand can be expected to lie within the interval.

g) Report the result as the estimate of the measurand $\pm$ the expanded uncertainty, together with the unit of measurement, and, at a minimum, state the coverage factor used to compute the expanded uncertainty and the estimated coverage probability.

To facilitate the computation and standardize the procedure, use of appropriate certified commercial software is a straightforward method that reduces the amount of routine work [6, 7]. In particular, the indicated partial derivatives can be easily obtained when such a software tool is used. Further references for the guidelines of measurement uncertainties are given in [3, 8, and 9].

B.5 Reference documents of Annex B

- [1] ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement* (GUM:1995)
- [2] ISO/IEC Guide 99:2007, *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms* (VIM)
- [3] TAYLOR, B.N. and KUYATT, C.E. *Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*. NIST Technical Note 1297, 1994 (Available at <<http://physics.nist.gov/Pubs/pdf.html>>)
- [4] KRAGTEN, J. Calculating standard deviations and confidence intervals with a universally applicable spreadsheet technique. *Analyst*, (1994) 119, 2161-2166
- [5] EURACHEM / CITAC Guide CG 4 Second edition:2000, *Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement*
- [6] Available at <http://www.gum.dk/e-wb-home/gw_home.html>
- [7] Available at <<http://www.isgmax.com/>>

- [8] CHURCHILL, E., HARRY, H.K., and COLLE, R., *Expression of the Uncertainties of Final Measurement Results*. NBS Special Publication 644 (1983)
- [9] JAB NOTE Edition 1:2003, *Estimation of Measurement Uncertainty (Electrical Testing / High Power Testing)*. (Available at <<http://www.jab.or.jp>>).

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-16:2013

Bibliography

- [1] ZHANG, D., LIANG, G-C., SHIH, C F., LU, ZH. and JOHANSSON, ME. A 19-pole cellular bandpass filters using 75-mm diameter high temperature superconducting thin films. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 1995, 5, p. 405.
- [2] ONO, RH., BOOTH, JC., STORK, F. and WILKER, C. Developing standards for the emerging technology of high temperature superconducting electronics. *Adv. in Superconductivity X, Tokyo: Springer*, 1998, p. 1407.
- [3] SIMON, RW., HAMMOND, RB., BERKOWITZ, BJ. and WILLEMSSEN, BA. Superconducting microwave filter systems for cellular telephone base stations. *Proc. IEEE*. **92** (2004) p. 1585.
- [4] YIN, YS., WEI, B., CAO, BS., GUO, XB., ZHANG, XP., HE, WJ., HE, S., GAO, LM., ZHU, MH. and GAO, BX. An HTS filter subsystem for 800 MHz mobile communication system. *Int. J. Modern Phys B* 19 (2005) p. 419.
- [5] KINDER, H., BERBERICH, P., UTZ, B. and PRUSSEIT, W. Double sided YBCO films on 4" substrates by thermal reactive evaporation. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 1995, 5, p. 1575.
- [6] FACE, DW., WILKER, C., SHEN, Z-Y., PANG, P. and SMALL, R. J. Large area YBa₂Cu₃O₇ films for high power microwave applications. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 1995, 5, p. 1581.
- [7] KOBAYASHI, Y., IMAI, T. and KAYANO, H. Microwave measurement of temperature and current dependences of surface impedance for high-T_c superconductors. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1991, 39, p. 1530.
- [8] WILKER, C., SHEN, Z.-Y., NGUYEN, VX., and BRENNER, MS. A sapphire resonator for microwave characterization of superconducting thin films. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 1993, 3, p. 1457.
- [9] MAZIERSKA, J. Dielectric resonator as a possible standard for characterization of high temperature superconducting films for microwave applications. *J. Supercond.*, 1997, 10, p. 73.
- [10] LLOPIS, O. and GRAFFEUIL, J. Microwave characterization of high T_c superconductors with a dielectric resonator. *J. Less-Common Met.*, 1990, 164, p. 1248.
- [11] IEC 61788-7:2006, *Superconductivity – Part 7: Electronic characteristic measurements – Surface resistance of superconductors at microwave frequencies*
- [12] YOSHIKAWA, H., OKAJIMA, S. and KOBAYASHI, Y. Comparison between BMT ceramic one-resonator method and sapphire two-resonator method to measure surface resistance of Hig-T_c superconductor films. *Proc. Asia-Pacific Microwave Conf.*, 1998, 2, p.1083.
- [13] HASHIMOTO, T. and KOBAYASHI, Y. Two-Sapphire-Rod-Resonator method to measure the surface resistance of High-T_c superconductor films. *IEICE Trans. Electron.*, 2004, E87-C, No. 5, p. 681.
- [14] SHEN, Z.-Y., WILKER, C., PANG, P., HOLSTEIN, WL., FACE, DW. and KOUNTZ, DJ. High T_c superconductor-sapphire microwave resonator with extremely high Q-values up to 90 K. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1992, 40, p. 2424.

- [15] OBARA, H. and KOSAKA, S. Microwave power dependence measurement of surface resistance of superconducting films using a dielectric resonator method with circle fit and two-mode techniques. *IEICE Trans. Electron.*, 2006, E89C, No. 2, p. 125.
 - [16] PRUSSEIT, W. Protective coating for $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ - thin film devices. *Applied Superconductivity 1999*, vol. 2, Inst. Phys. Conf. Ser., 2000, 167, p. 69.
-

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-16:2013

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-16:2013

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	34
INTRODUCTION	36
1 Domaine d'application	37
2 Références normatives	37
3 Termes et définitions	37
4 Exigences	38
5 Appareillage	38
5.1 Système de mesure	38
5.1.1 Système de mesure de la $\tan \delta$ de la tige en saphir	38
5.1.2 Système de mesure de la dépendance par rapport à la puissance de la résistance de surface de supraconducteurs aux hyperfréquences	39
5.2 Instruments de mesure	40
5.2.1 Résonateur au saphir	40
5.2.2 Tige en saphir	41
5.2.3 Films supraconducteurs	41
6 Mode opératoire de mesure	42
6.1 Montage	42
6.2 Mesure de la $\tan \delta$ de la tige en saphir	42
6.2.1 Généralités	42
6.2.2 Mesure de la réponse en fréquence du mode TE_{021}	42
6.2.3 Mesure de la réponse en fréquence du mode TE_{012}	43
6.2.4 Détermination de la $\tan \delta$ de la tige en saphir	44
6.3 Mesure de la dépendance vis-à-vis de la puissance	45
6.3.1 Généralités	45
6.3.2 Étalonnage de la puissance hyperfréquence incidente sur le résonateur	45
6.3.3 Mesure du niveau de référence	45
6.3.4 Mesure de la résistance de surface en fonction de la puissance hyperfréquence incidente	45
6.3.5 Détermination de la densité maximale de flux magnétique de surface	46
7 Incertitude de la méthode d'essai	47
7.1 Résistance de surface	47
7.2 Température	48
7.3 Structure support d'éprouvette et de maintien	48
7.4 Protection de l'éprouvette	48
8 Rapport d'essai	48
8.1 Identification de l'éprouvette	48
8.2 Rapport des valeurs de dépendance de R_s vis-à-vis de la puissance	49
8.3 Rapport des conditions d'essai	49
Annexe A (informative) Informations complémentaires concernant les Articles 1 à 7	50
Annexe B (informative) Considérations relatives à l'incertitude	56
Bibliographie	61
Figure 1 – Système de mesure de la $\tan \delta$ de la tige en saphir	39
Figure 2 – Système de mesure de la dépendance par rapport à la puissance de la résistance de surface	40

Figure 3 – Résonateur au saphir (type ouvert) pour mesurer la résistance de surface de films supraconducteurs	41
Figure 4 – Paramètres de dispersion de réflexion ($ S_{11} $ et $ S_{22} $)	43
Figure 5 – Définitions des termes du Tableau 3.	47
Figure A.1 – Trois types de résonateurs à tige en saphir.....	50
Figure A.2 – Diagramme de mode pour un résonateur au saphir (voir CEI 61788-15)	51
Figure A.3 – Mesure du facteur de qualité Q_L en charge en utilisant la méthode classique à 3 dB et la méthode d'ajustement à un cercle	52
Figure A.4 – Dépendance vis-à-vis de la température de la $\tan \delta$ d'une tige en saphir mesurée en utilisant la méthode du résonateur diélectrique à deux modes de résonance [3].....	54
Figure A.5 – Dépendance de la résistance de surface R_s sur la densité maximale de flux magnétique de surface $B_s \text{ max}$ [3].....	54
Tableau 1 – Dimensions types de la tige en saphir	41
Tableau 2 – Spécifications de l'analyseur de réseau vectoriel	47
Tableau 3 – Spécifications des tiges en saphir.....	47
Tableau B.1 – Signaux de sortie de deux extensomètres nominalelement identiques.....	57
Tableau B.2 – Valeurs moyennes de deux signaux de sortie.....	57
Tableau B.3 – Écarts types expérimentaux de deux signaux de sortie.....	57
Tableau B.4 – Incertitudes type de deux signaux de sortie.....	58
Tableau B.5 – Coefficient de variation de deux signaux de sortie.....	58

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-16:2013

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 16: Mesures de caractéristiques électroniques – Résistance de surface des supraconducteurs aux hyperfréquences en fonction de la puissance

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de la CEI. La CEI n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de brevet. La CEI 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 CEI 61788-16 a été établie par le comité d'études 90 de la CEI: Supraconductivité.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
90/309/FDIS	90/318/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.

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

Une liste de toutes les parties de la série CEI 61788, publiées sous le titre général *Supraconductivité*, peut être consultée sur le site web de la CEI.

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

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-16:2013

INTRODUCTION

Depuis la découverte des supraconducteurs à haute température critique (T_c) (HTS), des recherches approfondies ont été menées dans le monde entier sur des applications électroniques et des applications à grande échelle.

Dans le domaine de l'électronique et en particulier des télécommunications, des dispositifs passifs en hyperfréquences, par exemple des filtres utilisant des HTS, sont actuellement mis au point et des essais sont en cours sur des sites [1, 2, 3, 4]¹.

Les matériaux supraconducteurs pour résonateurs, filtres, antennes et lignes à retard hyperfréquences, présentent l'avantage d'avoir des caractéristiques de très faibles pertes. La connaissance de ce paramètre est vitale pour la mise au point de nouveaux matériaux côté fournisseur, et pour la conception de composants supraconducteurs hyperfréquences côté utilisateur. Les paramètres des matériaux supraconducteurs nécessaires pour concevoir des composants hyperfréquences sont la résistance de surface R_s et la dépendance de R_s vis-à-vis de la température. Les progrès récents dans les films minces à HTS avec une R_s de plusieurs ordres de grandeur de moins que pour les métaux normaux ont fait apparaître la nécessité d'une technique de caractérisation fiable pour mesurer cette propriété [5,6]. Parmi plusieurs méthodes en vue de mesurer la valeur R_s des matériaux supraconducteurs aux hyperfréquences, la méthode du résonateur diélectrique [7,8,9] s'est avérée utile en raison du fait que la méthode permet de mesurer la valeur R_s de manière précise et non destructive. En particulier, le résonateur saphir constitue un excellent outil pour mesurer la valeur de R_s des matériaux HTS [10]. En 2002, la Commission Électrotechnique Internationale (CEI) a publié la méthode du résonateur diélectrique en tant que norme de mesure [11].

La méthode d'essai figurant dans la présente norme permet la mesure de la résistance de surface des supraconducteurs aux hyperfréquences en fonction de la puissance. Pour des applications de dispositifs hyperfréquences de grande puissance, tels que ceux des dispositifs émetteurs, non seulement la dépendance de R_s vis-à-vis de la température mais également la dépendance de R_s vis-à-vis de la puissance sont nécessaires pour concevoir les composants hyperfréquences. En se fondant sur la dépendance mesurée par rapport à la puissance, on peut évaluer la dépendance de la résistance de surface par rapport à la densité de courant RF (radiofréquence). Le logiciel de simulation permettant de concevoir le dispositif fournit la répartition du courant RF dans le dispositif. On peut comparer directement à la simulation les résultats de la mesure de la dépendance vis-à-vis de la puissance et ces résultats permettent d'évaluer la capacité de traitement de puissance du dispositif.

La méthode d'essai fournie dans la présente norme peut également être appliquée à d'autres plaques supraconductrices brutes incluant un matériau à basse T_c .

La présente norme est destinée à fournir une base technique actuellement appropriée et admissible pour les ingénieurs travaillant dans le domaine de l'électronique et de la technologie de la supraconductivité.

La méthode d'essai traitée dans la présente norme s'appuie en partie sur les travaux de pré-normalisation du VAMAS (Versailles Project on Advanced Materials and Standards) sur les propriétés des films minces de supraconducteurs.

¹ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la Bibliographie.

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 16: Mesures de caractéristiques électroniques – Résistance de surface des supraconducteurs aux hyperfréquences en fonction de la puissance

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 61788 implique la description de la méthode de mesure normale de la résistance de surface des supraconducteurs aux hyperfréquences en fonction de la puissance par la méthode du résonateur au saphir. La grandeur de mesure est la dépendance en fonction de la puissance de R_s à la fréquence de résonance.

La gamme de mesures applicable des résistances de surface pour cette méthode est indiquée ci-dessous.

Fréquence: $f \sim 10$ GHz

Puissance hyperfréquence d'entrée: $P_{in} < 37$ dBm (5 W)

Il s'agit de consigner dans un rapport les données de résistance de surface à la fréquence mesurée et celles qui sont ramenées à une échelle de 10 GHz en utilisant la relation $R_s \propto f^2$ pour la comparaison

2 Références normatives

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

CEI 60050 (toutes les parties), *Vocabulaire Électrotechnique International* (disponible à l'adresse: <<http://www.electropedia.com>>)

CEI 61788-15, *Supraconductivité – Partie 15: Mesures de caractéristiques électroniques - Impédance de surface intrinsèque de films supraconducteurs aux fréquences micro-ondes*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les définitions données dans la CEI 60050-815 s'appliquent, l'une d'entre elles étant reportée ici par commodité.

3.1

impédance de surface

impédance d'un matériau métallique ou d'un supraconducteur lorsqu'une onde électromagnétique de haute fréquence est confinée à la surface

Note 1 à l'article: L'impédance de surface contrôle les pertes thermiques des cavités radiofréquences supraconductrices

Note 2 à l'article: L'impédance de surface Z_s des conducteurs, y compris les supraconducteurs, est définie comme le rapport entre le champ électrique E_t et le champ magnétique H_t , tangentiels à la surface d'un conducteur:

$$Z_s = E_t / H_t = R_s + jX_s,$$

où R_s est la résistance de surface X_s est la réactance de surface.

4 Exigences

La résistance de surface R_s d'un film supraconducteur doit être mesurée en appliquant un signal hyperfréquence à un résonateur à saphir avec l'éprouvette de film supraconducteur, puis en mesurant l'affaiblissement d'insertion du résonateur à chaque fréquence. On doit effectuer un balayage de fréquence autour de la fréquence de résonance en tant que centre et les caractéristiques "affaiblissement d'insertion-fréquence" doivent être enregistrées afin d'obtenir la valeur de Q , qui correspond aux pertes.

L'incertitude type combinée relative cible de cette méthode est le coefficient de variation (écart type divisé par la moyenne des déterminations de résistance de surface), qui est inférieur à 20 % pour une gamme de températures de mesure allant de 30 K à 80 K.

Il est de la responsabilité de l'utilisateur de la présente norme de consulter et de déterminer les pratiques de sécurité et de santé appropriées et de déterminer l'applicabilité des limitations réglementaires avant utilisation.

Ces mesures présentent des dangers. L'utilisation d'un système cryogénique est essentielle pour refroidir les supraconducteurs et permettre la transition dans l'état supraconducteur. Un contact direct de la peau avec des composants froids du dispositif peut produire une gelure immédiate, tout comme un contact direct avec un cryogène répandu. L'utilisation d'un générateur RF (radiofréquence) est également essentielle pour mesurer les propriétés des matériaux à haute fréquence. Si sa puissance est excessive, un contact direct avec le corps humain peut provoquer des brûlures immédiates.

5 Appareillage

5.1 Système de mesure

5.1.1 Système de mesure de la $\tan \delta$ de la tige en saphir

La Figure 1 est un dessin schématique du système nécessaire pour la mesure de $\tan \delta$. Le système est constitué d'un système analyseur de réseau pour les mesures de transmission, un appareil de mesure dans lequel est fixé un résonateur à saphir avec des films supraconducteurs et un thermomètre pour surveiller la température de mesure.

La puissance incidente générée par une source hyperfréquence appropriée, par exemple un dispositif de balayage synthétisé, est appliquée au résonateur à saphir fixé dans l'appareil de mesure. Les caractéristiques de transmission sont représentées sur l'affichage de l'analyseur de réseau. L'appareil de mesure est fixé dans un cryoréfrigérateur régulé en température.

Pour mesurer la $\tan \delta$ de la tige en saphir, un analyseur de réseau vectoriel est recommandé, car sa précision de mesure est supérieure à celle d'un analyseur de réseau scalaire en raison de sa grande plage dynamique.

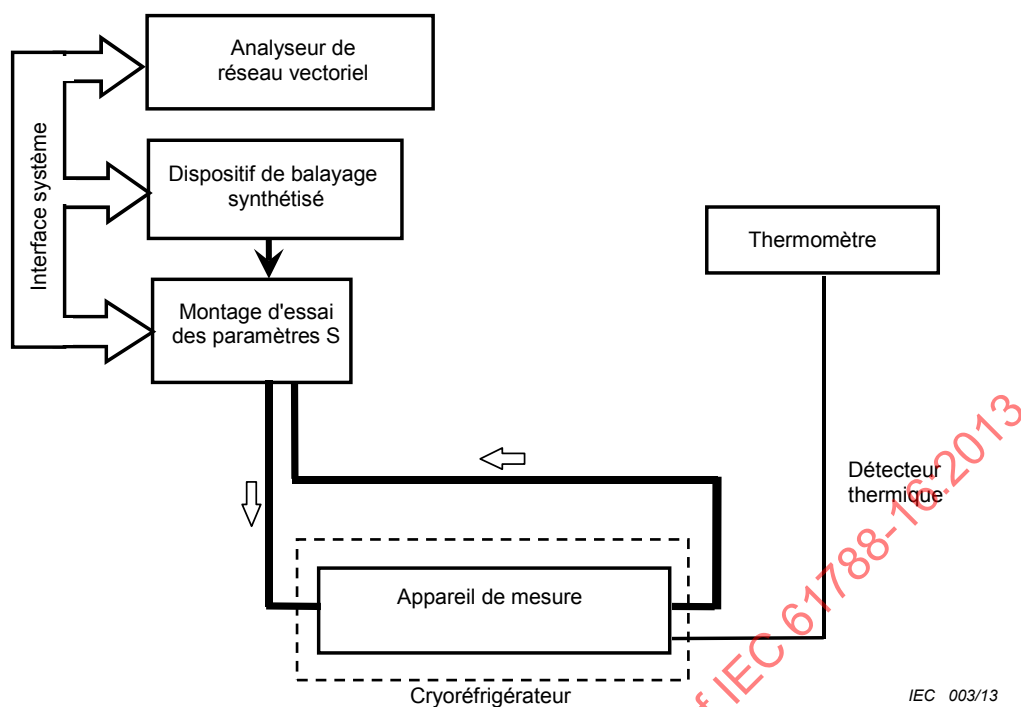


Figure 1 – Système de mesure de la $\tan \delta$ de la tige en saphir

5.1.2 Système de mesure de la dépendance par rapport à la puissance de la résistance de surface de supraconducteurs aux hyperfréquences

La Figure 2 représente le système de mesure de la dépendance par rapport à la puissance de la résistance de surface de supraconducteurs utilisant un résonateur au saphir. Un amplificateur de puissance à tube à ondes progressives (TOP) d'une puissance de sortie maximale d'environ 40 dBm est inséré à l'entrée du résonateur. La puissance d'entrée maximale dans le résonateur se situe aux environs de 37 dBm dans ce système de mesure représenté à la Figure 2. La puissance d'entrée maximale type d'un analyseur de réseau est de l'ordre de 0 dBm, de sorte qu'un circuit de mesure doit être conçu pour éviter une exposition directe des hyperfréquences de forte puissance à l'analyseur de réseau et en utilisant également un circulateur et un atténuateur, il convient qu'une réflexion significative du résonateur au saphir n'affecte pas l'amplificateur à TOP.

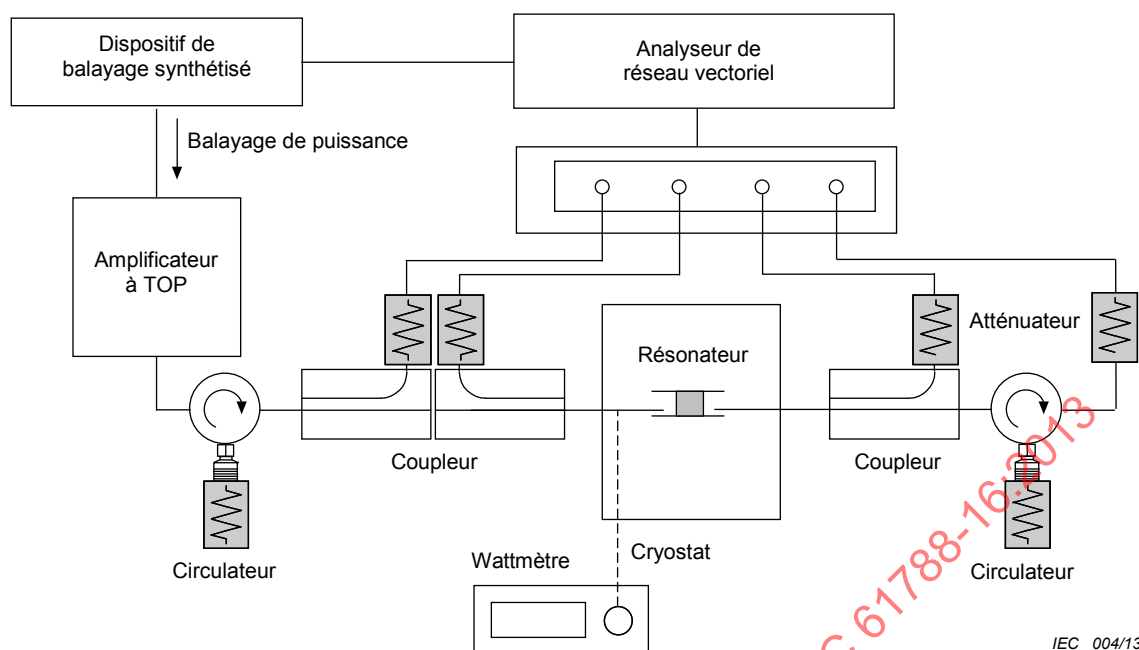


Figure 2 – Système de mesure de la dépendance par rapport à la puissance de la résistance de surface

La puissance hyperfréquence incidente sur le résonateur est étalonnée en utilisant un wattmètre avant d'effectuer la mesure (ligne en pointillés sur la Figure 2). On effectue un balayage de la puissance hyperfréquence incidente en modifiant la puissance d'entrée de l'amplificateur à TOP (tube à ondes progressives).

5.2 Instruments de mesure

5.2.1 Résonateur au saphir

La Figure 3 est un dessin schématic d'un résonateur au saphir type (résonateur de type ouvert) utilisé pour mesurer la R_s de films supraconducteurs et la $\tan \delta$ de la tige en saphir [9]. Dans le résonateur au saphir, une tige en saphir a été intercalée entre deux films supraconducteurs.

Le film supraconducteur supérieur est poussé vers le bas par un ressort qui est réalisé en bronze phosphoreux. Utilisation d'un ressort du type plaque est recommandée pour améliorer la précision de la mesure. Ce type de ressort diminue le frottement entre le ressort et le reste de l'appareil et facilite le mouvement des films supraconducteurs pendant la dilatation thermique de la tige en saphir.

Deux câbles semi-rigides destinés à mesurer les caractéristiques de transmission du résonateur doivent être fixés de part et d'autre du résonateur dans des positions axialement symétriques ($\phi = 0$ et π , où ϕ est l'angle de rotation autour de l'axe central de la tige en saphir). Un câble semi-rigide d'un diamètre extérieur de 3,50 mm est recommandé. Chacun des deux câbles semi-rigides doit avoir une petite boucle à l'extrémité. Le plan de la boucle doit être parallèle à celui des films supraconducteurs pour supprimer les modes TM_{mn0} indésirables. On doit soigneusement vérifier dans les boucles de couplage qu'il n'y a pas de fissures dans la jonction soudée par point, pouvant s'être créées au cours des cycles thermiques répétés. Ces câbles peuvent se déplacer à droite et à gauche pour régler l'affaiblissement d'insertion (IA). Pendant ce réglage, le couplage des modes indésirables avec le mode de résonance intéressant doit être supprimé. Un couplage indésirable avec les autres modes diminue la valeur de Q du résonateur en mode TE. Pour supprimer le couplage indésirable, on doit prêter une attention particulière à la conception des résonateurs à fort Q . Deux autres types de résonateurs utilisables avec le type ouvert représenté à la Figure 3 sont expliqués en A.1.

Une ligne de référence faite d'un câble semi-rigide doit être utilisée pour mesurer le niveau total de la puissance d'émission, c'est-à-dire le niveau de référence. La longueur du câble est égale à la somme des deux câbles de l'appareil de mesure.

Pour réduire l'erreur de mesure au minimum, deux films supraconducteurs doivent être disposés en parallèle. Pour s'assurer que les deux films supraconducteurs restent en contact étroit avec les extrémités de la tige en saphir sans aucun espace d'air, la surface des deux films et les deux extrémités de la tige doivent être soigneusement nettoyées.

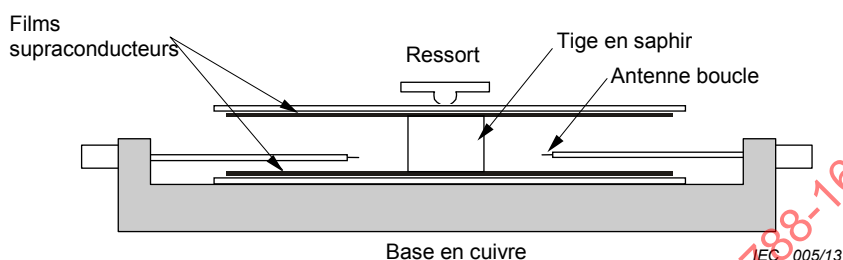


Figure 3 – Résonateur au saphir (type ouvert) pour mesurer la résistance de surface de films supraconducteurs

5.2.2 Tige en saphir

Une tige en saphir de haute qualité avec une faible $\tan \delta$ est nécessaire pour obtenir la précision de mesure demandée de R_s . On s'attend à ce qu'une tige en saphir recommandée ait une $\tan \delta$ inférieure à 10^{-6} à 77 K.

Pour réduire l'erreur de mesure de R_s des films supraconducteurs au minimum, les deux extrémités des tiges en saphir doivent être polies parallèlement l'une à l'autre et perpendiculairement à l'axe. Les spécifications des tiges en saphir sont décrites en 7.1.

Le diamètre et la hauteur de la tige en saphir doivent être soigneusement choisis pour s'assurer que les modes TE_{011} , TE_{021} et TE_{012} ne sont pas couplés aux autres modes TM, HE et EH, car un couplage entre un mode TE et d'autres modes provoquent une dégradation du Q à vide. La ligne directrice de conception de la tige en saphir est décrite en A.2. Le Tableau 1 indique les dimensions types de la tige en saphir pour une fréquence de résonance en mode TE_{011} d'environ 10 GHz.

Tableau 1 – Dimensions types de la tige en saphir

Mode de résonance	Fréquence GHz	Diamètre	Hauteur
		d mm	h mm
TE_{011}	10,6	11,8	6,74
TE_{021}	17,0		
TE_{012}	17,0		

5.2.3 Films supraconducteurs

Le diamètre des films supraconducteurs doit être environ trois fois plus grand que celui des tiges en saphir. Avec cette configuration, l'incertitude accrue de R_s due aux pertes de rayonnement peut être considérée comme négligeable, étant donnée l'incertitude combinée relative cible de 20 %.

L'épaisseur du film doit être supérieure à trois fois la valeur de la profondeur de pénétration de Londres à chaque température. Si l'épaisseur du film est inférieure à trois fois la

profondeur de pénétration de Londres, il convient que la R_s mesurée signifie la résistance de surface effective.

6 Mode opératoire de mesure

6.1 Montage

Tous les composants du résonateur en saphir, tels que la tige en saphir, les films supraconducteurs et ainsi de suite, doivent être maintenus dans un état propre et sec, par exemple dans une boîte sèche ou un dessiccateur, car une forte humidité peut dégrader la valeur de Q à vide.

Le résonateur en saphir doit être fixé dans une chambre à éprouvette à l'intérieur du cryoréfrigérateur régulé en température. On doit généralement faire le vide dans la chambre à éprouvette. Les températures des films supraconducteurs et de la tige en saphir doivent être mesurées par un thermomètre à diode ou un thermocouple. Les températures des films supraconducteurs supérieur et inférieur et de la tige en saphir doivent être maintenues aussi proches que possible. Ceci peut être réalisé en recouvrant le résonateur en saphir d'une feuille d'aluminium ou en remplaçant la chambre à éprouvette avec de l'hélium gazeux.

6.2 Mesure de la $\tan \delta$ de la tige en saphir

6.2.1 Généralités

Pour mesurer précisément la résistance de surface des films supraconducteurs en utilisant un résonateur à saphir, la $\tan \delta$ de la tige en saphir doit être connue. La méthode du résonateur diélectrique à deux modes de résonance [12,13], qui utilise les modes TE_{021} et TE_{012} du même résonateur en saphir doit être adoptée pour mesurer la $\tan \delta$ de la tige en saphir. La procédure de mesure de la $\tan \delta$ est la suivante:

6.2.2 Mesure de la réponse en fréquence du mode TE_{021}

La dépendance vis-à-vis de la température de la fréquence de résonance f_0 et le facteur de qualité à vide Q_u pour le mode de résonance TE_{021} doivent être mesurés comme suit:

- Raccorder le système de mesure comme représenté à la Figure 1. Fixer des distances égales entre la tige en saphir et chacune des boucles des câbles semi-rigides, de telle sorte que ce résonateur de type transmission puisse être sous-couplé aux deux boucles d'une manière égale. Le couplage doit être réglé de manière à être suffisamment faible pour ne pas exciter les modes de résonance indésirables, tels que les modes TM, HE et EH mais suffisamment fort pour pouvoir exciter le mode TE_{021} . La puissance d'entrée du résonateur doit être inférieure à 10 dBm (généralement de 0 dBm). Confirmer que l'affaiblissement d'insertion de ce mode est supérieur à 20 dB par rapport au niveau de référence. Vider et refroidir la chambre à éprouvette au-dessous de la température critique.
- Mesurer (S_{21}) en fonction de la fréquence. où S_{21} est le paramètre de dispersion de transmission. Rechercher la crête de résonance de $|S_{21}|$ du mode TE_{021} de ce résonateur à une fréquence pratiquement égale à la valeur prévue de la fréquence de résonance f_0 .
- Rétrécir l'excursion de fréquences sur l'afficheur de façon que seule la crête de résonance de $|S_{21}|$ du mode TE_{021} puisse être affichée.
- Noter à la fois les parties réelles et imaginaires de S_{21} , S_{11} et S_{22} en fonction de la fréquence ($S_{21}(f)$, $S_{11}(f)$ et $S_{22}(f)$) où S_{11} et S_{22} sont les paramètres de dispersion de réflexion.
- La fréquence de résonance f_0 et la valeur de Q en charge, Q_L , sont obtenues en ajustant les données mesurées expérimentalement $S_{21}(f)$ à l'équation (1), où f_0 et Q_L sont les paramètres d'ajustement.

$$S_{21}(f) = \frac{S_{21}(f_0)}{1 + iQ_L \Delta(f)} \quad (1)$$

où f est la fréquence et $\Delta(f)$ est défini par

$$\Delta(f) = 1 - \frac{f_0^2}{f^2} \quad (2)$$

Cette technique d'ajustement est appelée "Technique d'ajustement à un cercle" et ses détails sont décrits en A.3.

- f) La valeur de Q à vide, Q_U , doit être extraite de Q_L au moyen de l'équation (3) suivante:

$$Q_U = Q_L (1 + \beta_1 + \beta_2) \quad (3)$$

où β_1 et β_2 sont les coefficients de couplage et sont définis par

$$\beta_1 = \frac{1 - |S_{11}|}{|S_{11}| + |S_{22}|} \quad (4)$$

$$\beta_2 = \frac{1 - |S_{22}|}{|S_{11}| + |S_{22}|} \quad (5)$$

où $|S_{11}|$ et $|S_{22}|$ sont les creux des paramètres de dispersion de réflexion à f_0 comme représenté à la Figure 4, et mesurés en unités linéaires de puissance plutôt qu'en dB relatifs.

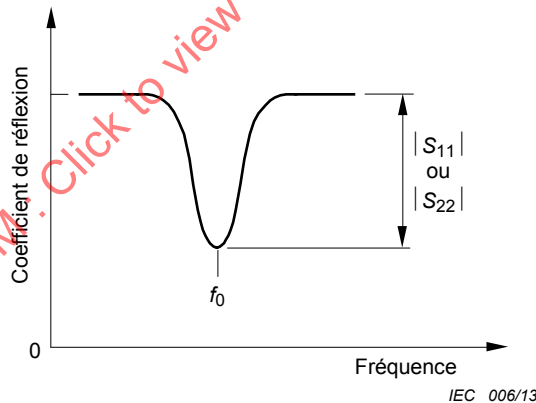


Figure 4 – Paramètres de dispersion de réflexion ($|S_{11}|$ et $|S_{22}|$)

- g) Les valeurs de f_0 et Q_U mesurées pour ce mode TE_{021} sont représentées par f_{021} et Q_{U021} . En faisant varier lentement la température du cryoréfrigérateur, la dépendance vis-à-vis de la température de f_{021} et Q_{U021} doit être mesurée.

6.2.3 Mesure de la réponse en fréquence du mode TE_{012}

La dépendance vis-à-vis de la température de la fréquence de résonance f_0 et le facteur de qualité à vide Q_U pour le mode de résonance TE_{012} doivent être mesurés de façon similaire au mode de résonance TE_{021} . La procédure est la suivante:

- a) Après avoir mesuré le mode TE_{021} , refroidir à nouveau la chambre à éprouvette au-dessous de la température critique.

- b) Mesurer S_{21} en fonction de la fréquence. Rechercher la crête de résonance de $|S_{21}|$ du mode TE_{012} de ce résonateur à une fréquence pratiquement égale à la valeur prévue de la fréquence de résonance f_0 .
- c) Rétrécir l'excursion de fréquence sur l'afficheur de façon que seule la crête de résonance de $|S_{21}|$ du mode TE_{012} puisse être affichée.
- d) Suivre les étapes du 6.2.2 d) à g) pour mesurer la dépendance vis-à-vis de la température de la fréquence de résonance f_0 et la valeur de Q à vide, Q_U , pour ce mode TE_{012} . Elles sont représentées par f_{012} et Q_{U012} .

6.2.4 Détermination de la $\tan \delta$ de la tige en saphir

En utilisant la valeur mesurée de f_{021} , Q_{U021} , f_{012} et Q_{U012} , la résistance de surface des films supraconducteurs R_s et la $\tan \delta$ de la tige en saphir sont données par les équations simultanées suivantes:

$$\left. \begin{aligned} R_s(f_{012}) &= \frac{1}{B_{012}} \left\{ \frac{A_{012}}{Q_{U012}} - \tan \delta(f_{012}) \right\} \\ R_s(f_{021}) &= \frac{1}{B_{021}} \left\{ \frac{A_{021}}{Q_{U021}} - \tan \delta(f_{021}) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

où A_{012} , B_{012} , A_{021} et B_{021} sont respectivement les facteurs géométriques de TE_{012} et TE_{021} , et sont donnés par

$$A = 1 + \frac{W}{\varepsilon'} \quad (7)$$

$$B = p^2 \left(\frac{\lambda_0}{2h} \right)^3 \frac{1+W}{30\pi^2 \varepsilon'}, \quad p = 1, 2, \dots, \quad (8)$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} \quad (9)$$

$$W = \frac{J_1^2(u) K_0(v) K_2(v) - K_1^2(v)}{K_1^2(v) J_1^2(u) - J_0(u) J_2(u)} \quad (10)$$

$$v^2 = \left(\frac{\pi d}{\lambda_0} \right)^2 \left[\left(\frac{p \lambda_0}{2h} \right)^2 - 1 \right] \quad (11)$$

$$u \frac{J_0(u)}{J_1(u)} = -v \frac{K_0(v)}{K_1(v)} \quad (12)$$

où,

λ_0 est la longueur d'onde de résonance en espace libre;

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

h est la hauteur de la tige en saphir et d est le diamètre de la tige en saphir.

$f_0 = f_{012}$ et $p = 2$ pour le mode TE_{012} , et $f_0 = f_{021}$ et $p = 1$ pour le mode TE_{021} mode, respectivement.

La valeur u^2 est donnée par l'équation transcendante (12) en utilisant les valeurs de v^2 , où $J_n(u)$ est la fonction de Bessel du premier type et $K_n(v)$ est la fonction de Bessel du deuxième

type, respectivement. Pour toute valeur de v , la même solution u existe entre u_{0m} et u_{1m} , où $J_0(u_{0m}) = 0$ et $J_1(u_{1m}) = 0$. $m = 1$ pour le mode TE_{012} et $m = 2$ pour le mode TE_{021} .

Dans l'équation (8), R_s et $\tan \delta$ dépendent toutes deux de la fréquence et les relations de changement d'échelle $R_s \propto f^2$ sont expliquées par le modèle à deux fluides, et $\tan \delta \propto f$, relation supposée pour les diélectriques à faible perte peut être appliquée.

$$R_s(f_{021}) = R_s(f_{012}) \times (f_{021} / f_{012})^2 \quad (13)$$

$$\tan \delta(f_{021}) = \tan \delta(f_{012}) \times (f_{021} / f_{012}) \quad (14)$$

Dans les équations (7) et (8), ϵ' est la permittivité relative de la tige en saphir et est donnée par

$$\epsilon' = \left(\frac{\lambda_0}{\pi d} \right)^2 (u^2 + v^2) + 1 \quad (15)$$

en utilisant les valeurs de v^2 et u^2 .

6.3 Mesure de la dépendance vis-à-vis de la puissance

6.3.1 Généralités

Lorsque la $\tan \delta$ de la tige en saphir a été mesurée, la résistance de surface et sa dépendance vis-à-vis de la puissance peuvent être évaluées en utilisant le mode de résonance unique. TE_{011} est approprié pour cette mesure, en raison de la forte crête de résonance. La procédure expérimentale pour la mesure de la dépendance vis-à-vis de la puissance est la suivante.

6.3.2 Étalonnage de la puissance hyperfréquence incidente sur le résonateur

La puissance hyperfréquence incidente sur le résonateur doit être étalonnée en utilisant un wattmètre avant d'effectuer la mesure (ligne en pointillés sur la Figure 2). La puissance incidente sur le résonateur, P_{in} , a été déterminée comme la puissance mesurée à l'entrée du résonateur.

6.3.3 Mesure du niveau de référence

On doit mesurer en premier le niveau de la puissance totale d'émission (niveau de référence). Raccorder la ligne de référence du câble semi-rigide entre les connecteurs d'entrée et de sortie. Mesurer ensuite le niveau de la puissance d'émission sur toute la plage de mesure de fréquence et de température. Le niveau de référence peut varier de plusieurs décibels lorsque la température de l'appareil passe de la température ambiante à la température la plus basse de la mesure. La dépendance du niveau de référence par rapport à la température doit donc être prise en compte.

6.3.4 Mesure de la résistance de surface en fonction de la puissance hyperfréquence incidente

- Raccorder le système de mesure comme représenté à la Figure 2. Fixer la distance entre la tige en saphir et les boucles des câbles semi-rigides en utilisant un couplage fort, de façon à pouvoir introduire la forte puissance hyperfréquence dans le résonateur. Une force de couplage appropriée est de $|S_{11}| \cong 3$ dB. Refroidir la chambre à éprouvette au-dessous de la température critique.
- Mesurer S_{21} en fonction de la fréquence. Rechercher la crête de résonance de $|S_{21}|$ du mode TE_{011} de ce résonateur à une fréquence pratiquement égale à la valeur prévue de la fréquence de résonance f_0 .

- c) Rétrécir l'excursion de fréquence sur l'afficheur de façon que seule la crête de résonance de $|S_{21}|$ du mode TE_{011} puisse être affichée. Mesurer l'affaiblissement d'insertion, a_{ins} , qui est l'affaiblissement (in dB) du niveau de référence jusqu'à $|S_{21}|$ à la fréquence de résonance f_0 du mode TE_{011} .
- d) Noter à la fois les parties réelles et imaginaires de S_{21} et S_{11} en fonction de la fréquence ($S_{21}(f)$ et $S_{11}(f)$).
- e) Suivre l'étape 6.2.2 e) pour mesurer la fréquence de résonance f_0 et la valeur de Q en charge, Q_L , pour ce mode TE_{011} . Elles sont représentées par f_{011} et Q_{L011} .
- f) Extraire la valeur de Q à vide, Q_{U011} , de Q_{L011} au moyen de l'équation suivante:

$$Q_{U011} = \frac{Q_{L011}}{1 - A_t}, A_t = 10^{-A[dB]/20} \quad (16)$$

- g) Les résistances de surface des films supraconducteurs sont obtenues par l'équation suivante:

$$R_s(f_{011}) = \frac{1}{B_{011}} \left\{ \frac{A_{011}}{Q_{U011}} - \tan \delta(f_{011}) \right\} \quad (17)$$

où A_{011} et B_{011} sont les facteurs géométriques du mode TE_{011} , et sont obtenues par les équations (7) à (15) en fixant $f_0 = f_{011}$, $p = 1$ et $m = 1$. Il convient que $\tan \delta(f_{011})$ soit la valeur changée d'échelle à f_{011} de la valeur déterminée en 6.2.4, qui correspond à f_{012} ,

$$\tan \delta(f_{011}) = \tan \delta(f_{012}) \times (f_{011}/f_{012}) \quad (18)$$

- h) La puissance hyperfréquence incidente a été balayée en modifiant la puissance d'entrée de l'amplificateur à TOP (Tube à ondes progressives) avec la chambre à éprouvette maintenue à température constante. Répéter les étapes c) à g) pour chaque puissance hyperfréquence incidente.
- i) Modifier la température de la chambre à éprouvette et répéter les étapes c) à h) pour chaque température.

6.3.5 Détermination de la densité maximale de flux magnétique de surface

La dépendance de la puissance hyperfréquence incidente mesurée de la résistance de surface elle-même n'indique pas directement la capacité d'absorption de puissance des films supraconducteurs. Cette dernière doit être mesurée en termes de la densité maximale du flux magnétique de surface sans provoquer la dégradation de ses propriétés. Une densité importante du flux magnétique de surface, c'est-à-dire du courant RF (radiofréquence), induit la rupture de pair de la paire de Cooper et augmente la résistance de surface. D'autre part, on considère qu'un couplage faible entre les limites granulaires ou la symétrie d'onde d du supraconducteur augmente la résistance de surface.

On doit calculer la densité maximale du flux magnétique de surface d'après la dépendance vis-à-vis de la puissance incidente mesurée de la résistance de surface comme suit [14 15].

La puissance dissipée dans le résonateur P_0 est évaluée d'après la puissance incidente dans le résonateur P_{in} et les paramètres S comme suit:

$$P_0 = P_{in} (1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2) \quad (19)$$

La densité de flux magnétique de surface des films supraconducteurs peut être calculée par l'équation analytique. La densité maximale du flux magnétique de surface $B_{s \max}$ est donnée par l'équation [14] suivante:

$$B_{s\max} = 0,581865 \left\{ \frac{2\pi R_s}{P_0} \int_0^{d/2} J_1^2 \left(\frac{2u}{d} \rho \right) \rho d\rho \left[1 + W + \frac{240\pi^2 \varepsilon' \tan \delta}{R_s} \left(\frac{h}{\lambda_0} \right)^3 \right] \right\}^{-1/2} \quad (20)$$

où d , J_1 , u , W , ε' , h et λ_0 sont les mêmes que ceux définis dans les équations (7) à (15), et λ_d est la profondeur de pénétration des films supraconducteurs. λ_d peut être mesurée directement conformément à la CEI 61788-15. Lorsque les données λ_d mesurées directement ne sont pas disponibles, il convient d'utiliser une valeur type rapportée pour le même matériau.

7 Incertitude de la méthode d'essai

7.1 Résistance de surface

On doit utiliser un analyseur de réseau vectoriel, comme spécifié dans le Tableau 2 pour enregistrer la dépendance de l'affaiblissement vis-à-vis de la fréquence. L'enregistrement résultant doit permettre la détermination de Q avec une incertitude relative de 10^{-2} .

Tableau 2 – Spécifications de l'analyseur de réseau vectoriel

Plage dynamique de S_{21}	au-dessus de 60 dB
Résolution de fréquence	au-dessous de 1 Hz
Incertitude d'affaiblissement	au-dessous de 0,1 dB
Limitation de la puissance d'entrée	au-dessous de 10 dBm

Les spécifications de la tige en saphir sont présentées dans le Tableau 3. Les définitions des termes du Tableau 3 sont présentées à la Figure 5.

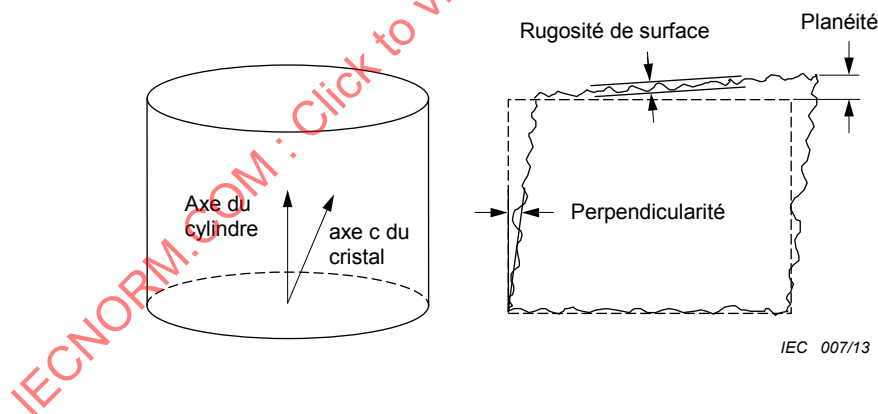


Figure 5 – Définitions des termes du Tableau 3.

Tableau 3 – Spécifications des tiges en saphir

Tolérance de diamètre	$\pm 0,05$ mm
Tolérance de hauteur	$\pm 0,05$ mm
Planéité	au-dessous de 0,005 mm
Rugosité de surface	surfaces supérieure et inférieure: hauteur moyenne quadratique au-dessous de 10 nm en valeur quadratique moyenne surface cylindrique: hauteur moyenne quadratique au-dessous de 0,001 mm en valeur quadratique moyenne
Perpendicularité	moins de $0,1^\circ$
Axe	parallèle à l'axe c à $0,3^\circ$ près

7.2 Température

L'appareil de mesure est refroidi jusqu'à la température spécifiée par tout moyen pendant l'essai. Un choix aisé consiste à immerger l'appareil dans un liquide cryogénique. Cette technique est rapide et simple et donne une température connue et stable. Malheureusement, la majeure partie des matériaux HTS (Supraconducteurs à haute température critique) sont endommagés par la condensation d'humidité qui se produit lorsqu'on retire l'échantillon du liquide cryogénique. De plus, les incertitudes générées par la présence d'un mélange gaz/liquide dans la cavité et l'inaptitude à mesurer la R_s en fonction de la température conduisent à l'utilisation d'autres méthodes de refroidissement. On peut contourner ces limitations par immersion d'un boîtier sous vide dans un liquide cryogénique. Si le boîtier sous vide est rempli de gaz, il se produit alors un refroidissement rapide et une température uniforme. Si des éléments chauffants sont fixés à l'appareil, les propriétés du matériau HTS en fonction de la température peuvent alors être mesurées. Un troisième choix également bon consiste à utiliser un cryoréfrigérateur. Dans ce cas, le résonateur est sous vide et il est refroidi par conduction à travers le conditionnement métallique. On doit également prendre soin d'éviter les gradients de températures avec l'appareil.

Un cryostat doit être doté de l'environnement nécessaire pour la mesure de R_s et l'échantillon doit être mesuré dans un état stable et isotherme. On suppose que la température de l'éprouvette est la même que celle du porte-échantillon. La température du support doit être rapportée avec une précision de ± 2 K, mesurée en utilisant un capteur de température approprié.

La différence entre les températures de l'éprouvette et du support doit être réduite au minimum en utilisant des écrans ayant une bonne conductivité thermique.

En ce qui concerne la mesure de dépendance vis-à-vis de la puissance, le chauffage de l'antenne en boucle par un niveau élevé de puissance hyperfréquence peut affecter les mesures. Pour minimiser les effets d'échauffement, il convient que la distance entre la tige en saphir et les boucles des câbles semi-rigides soit suffisamment courte pour réaliser un couplage fort et pour diminuer le niveau de la puissance hyperfréquence incidente pour la mesure de puissance. Une force de couplage appropriée est de $|S_{11}| \cong 3$ dB, comme représenté en 6.3.4 a).

7.3 Structure support d'éprouvette et de maintien

La structure support doit constituer un support adéquat pour l'éprouvette. Il est impératif que les deux films soient parallèles et mécaniquement stables dans l'ensemble de la mesure, en particulier dans un cryoréfrigérateur et sur une large gamme de températures.

7.4 Protection de l'éprouvette

La condensation d'humidité et une griffure du film dégradent les propriétés de supraconductivité. Il convient de prévoir certaines mesures de protection pour les éprouvettes. Un revêtement en polytétrafluoroéthylène (PTFE) ou en polyméthylméthacrylate n'affecte pas les mesures, ceux-ci peuvent donc être utilisés pour la protection [16]. Une épaisseur de matériau de recouvrement inférieure à quelques micromètres est recommandée.

8 Rapport d'essai

8.1 Identification de l'éprouvette

L'éprouvette doit être identifiée, autant que possible, par les éléments suivants:

- a) nom du fabricant de l'éprouvette;
- b) classification et/ou symbole;
- c) numéro de lot;

- d) composition chimique du film mince et du substrat;
- e) épaisseur et rugosité du film mince;
- f) technique de processus de fabrication.

8.2 Rapport des valeurs de dépendance de R_s vis-à-vis de la puissance

Les valeurs de R_s ainsi que leurs valeurs f_{011} , Q_u , ε' , $\tan \delta$, P_{in} correspondantes et leur dépendance maximale de densité de flux magnétique de surface, ($B_{s \max}$) doivent être indiquées.

8.3 Rapport des conditions d'essai

Les conditions d'essai suivantes doivent être consignées;

- a) fréquence d'essai et résolution de fréquence;
- b) puissance incidente RF (radiofréquence) maximale d'essai;
- c) température d'essai, incertitude de température et différence de température de deux plaques;
- d) historique de la température de l'échantillon en fonction du temps.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-16:2013

Annexe A (informative)

Informations complémentaires concernant les Articles 1 à 7

A.1 Trois types de résonateurs à tige en saphir

Un couplage parasite indésirable avec l'autre mode diminue la valeur de Q du résonateur en mode TE. Pour supprimer le couplage parasite, on prête une attention particulière à la conception des résonateurs à fort Q . Trois types de résonateurs sont proposés et représentés à la Figure A.1:

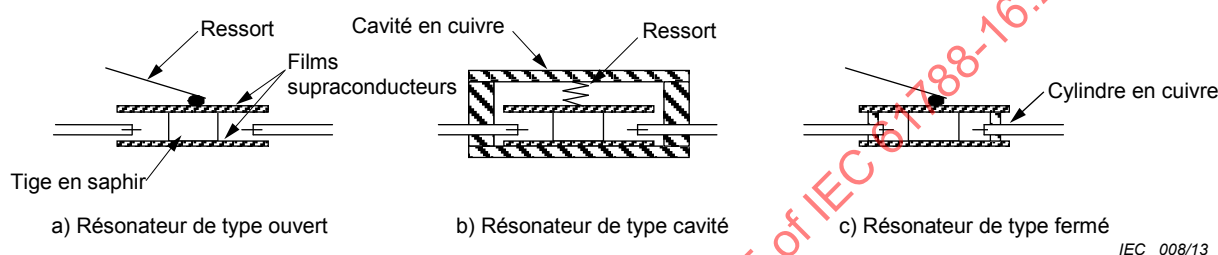


Figure A.1 – Trois types de résonateurs à tige en saphir

- a) Résonateur de type ouvert: une tige en saphir à faibles pertes est placée entre deux films supraconducteurs parallèles. Deux câbles semi-rigides pour le couplage du dipôle magnétique d'entrée et de sortie RF (radiofréquence) sont fixés des deux côtés du résonateur. Avec cette configuration, il convient de concevoir avec soin la position verticale des câbles de couplage de façon à éviter aux pertes de rayonnement de se propager le long des câbles de couplage, ce qui dégrade le fort Q du mode TE_{0mp} et produit une erreur plus grande pour les mesures de R_s .
- b) Résonateurs de type cavité: le résonateur de type ouvert représenté en a) est placé à l'intérieur d'une cavité conductrice (en cuivre).
- c) Résonateurs de type fermé: un cylindre conducteur (en cuivre) est placé entre les films supraconducteurs. Avec cette configuration, la perte de rayonnement le long du câble de couplage est fortement bloquée par le cylindre en cuivre.

L'appareil de mesure du cryoréfrigérateur est protégé des perturbations mécaniques et thermiques en utilisant par exemple des absorbeurs de vibrations et/ou en recouvrant l'appareil d'un écran contre le rayonnement et en l'installant dans un manipulateur axial X-Y et/ou Z-pour régler les positions d'échantillonnage dans la gamme approximativement de ± 1 mm.

La longueur de boucle de l'antenne est conçue en se basant sur la règle du quart de longueur d'onde pour obtenir la sensibilité de mesure maximale.

A.2 Dimensions de la tige en saphir

La méthode du résonateur diélectrique à deux modes de résonance utilisée dans la présente norme utilise un seul résonateur saphir qui diffère de celui de la norme CEI (CEI 61788-7:2006) qui lui utilise deux résonateurs saphir de qualité de $\tan\delta$ presque identique. L'utilisation d'un seul résonateur saphir permet de réduire l'incertitude de la résistance en surface mesurée qui pourrait résulter de l'utilisation de deux résonateurs en saphir avec des tiges en saphir de qualités même légèrement différentes.