IEC 61788-16

Edition 1.0 2013-01

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

colour inside

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

V

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.

® Registered trademark of the International Electrotechnical Commission
Marque déposée de la Commission Electrotechnique Internationale

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 δ 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 δ 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 δ 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 δ 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 δ 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

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.

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 ~ 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*

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 δ 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 δ 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 δ 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 δ 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 δ 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 $B_{S\ max}$ [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 nominalement 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

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.

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*