



IEC 61788-15

Edition 1.0 2011-10

# INTERNATIONAL STANDARD

## NORME INTERNATIONALE



---

### **Superconductivity –**

**Part 15: Electronic characteristic measurements – Intrinsic surface impedance of superconductor films at microwave frequencies**

### **Supraconductivité –**

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

INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

COMMISSION  
ELECTROTECHNIQUE  
INTERNATIONALE

PRICE CODE  
CODE PRIX



---

ICS 29.050

ISBN 978-2-88912-710-8

## CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references.....	7
3 Terms and definitions.....	7
4 Requirements.....	8
5 Apparatus.....	9
5.1 Measurement equipment.....	9
5.2 Measurement apparatus.....	9
5.3 Dielectric rods.....	13
5.4 Superconductor films and copper cavity.....	14
6 Measurement procedure.....	14
6.1 Set-up.....	14
6.2 Measurement of the reference level.....	14
6.3 Measurement of the $R_S$ of oxygen-free high purity copper.....	14
6.4 Determination of the effective $R_S$ of superconductor films and $\tan\delta$ of standard dielectric rods.....	17
6.5 Determination of the penetration depth.....	18
6.6 Determination of the intrinsic surface impedance.....	20
7 Uncertainty of the test method.....	21
7.1 Measurement of unloaded quality factor.....	21
7.2 Measurement of loss tangent.....	21
7.3 Temperature.....	22
7.4 Specimen and holder support structure.....	22
8 Test Report.....	22
8.1 Identification of test specimen.....	22
8.2 Report of the intrinsic $Z_S$ values.....	22
8.3 Report of the test conditions.....	22
Annex A (informative) Additional information relating to clauses 1 to 8.....	24
Annex B (informative) Uncertainty considerations.....	41
Bibliography.....	45
Figure 1 – Schematic diagram for the measurement equipment for the intrinsic $Z_S$ of HTS films at cryogenic temperatures.....	10
Figure 2 – Schematic diagram of a dielectric resonator with a switch for thermal connection.....	10
Figure 3 – Typical dielectric resonator with a movable top plate.....	11
Figure 4 – Switch block for thermal connection.....	12
Figure 5 – Dielectric resonator assembled with a switch block for thermal connection.....	13
Figure 6 – A typical resonance peak. Insertion attenuation $IA$ , resonant frequency $f_0$ and half power bandwidth $\Delta f_{3dB}$ are defined.....	16
Figure 7 – Reflection scattering parameters $S_{11}$ and $S_{22}$ .....	18
Figure 8 – Definitions for terms in Table 5.....	22
Figure A.1 – Schematic diagram for the measurement system.....	24
Figure A.2 – A motion stage using step motors.....	25

Figure A.3 – Cross-sectional view of a dielectric resonator .....	26
Figure A.4 – A diagram for simplified cross-sectional view of a dielectric resonator .....	30
Figure A.5 – Mode chart for a sapphire resonator .....	33
Figure A.6 – Frequency response of the sapphire resonator.....	34
Figure A.7 – $Q_U$ versus temperature for the $TE_{021}$ and the $TE_{012}$ modes of the sapphire resonator with 360 nm-thick YBCO films .....	35
Figure A.8 – The resonant frequency $f_0$ versus temperature for the $TE_{021}$ and $TE_{012}$ modes of the sapphire resonator with 360 nm-thick YBCO films.....	35
Figure A.9 – The temperature dependence of the $R_{Se}$ of YBCO films with the thicknesses of 70 nm to 360 nm measured at ~40 GHz.....	36
Figure A.10 – The temperature dependence of $\Delta\lambda_e$ for the YBCO films with the thicknesses of 70 nm and 360 nm measured at ~40 GHz.....	36
Figure A.11 – The penetration depths $\lambda$ of the 360 nm-thick YBCO film measured at 10 kHz by using the mutual inductance method and at ~40 GHz by using sapphire resonator .....	37
Figure A.12 – The temperature dependence of the intrinsic surface resistance $R_S$ of YBCO films with the thicknesses of 70 nm to 360 nm measured at ~40 GHz.....	37
Figure A.13 – Comparison of the temperature-dependent value of each term in Equation (A.35) for the $TE_{021}$ mode of the standard sapphire resonator.....	38
Figure A.14 – Comparison of the temperature-dependent value of each term in Equation (A.35) for the $TE_{012}$ mode of the standard sapphire resonator.....	38
Figure A.15 – Temperature dependence of uncertainty in the measured intrinsic $R_S$ of YBCO films.....	39
Table 1 – Typical dimensions of a sapphire rod .....	14
Table 2 – Typical dimensions of OFHC cavities and HTS films.....	14
Table 3 – Geometrical factors and filling factors calculated for the standard sapphire resonator .....	17
Table 4 – Specifications of vector network analyzer.....	21
Table 5 – Type B uncertainty for the specifications on the sapphire rod.....	21
Table A.1 – Geometrical factors and filling factors calculated for the standard sapphire resonator .....	31
Table B.1 – Output signals from two nominally identical extensometers .....	42
Table B.2 – Mean values of two output signals .....	42
Table B.3 – Experimental standard deviations of two output signals.....	42
Table B.4 – Standard uncertainties of two output signals .....	42
Table B.5 – Coefficient of variations of two output signals.....	43

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

## SUPERCONDUCTIVITY –

**Part 15: Electronic characteristic measurements –  
Intrinsic surface impedance of superconductor  
films 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 61788-15 has been prepared by IEC technical committee 90: Superconductivity.

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

FDIS	Report on voting
90/280/FDIS	90/283/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 parts of 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 research has been performed worldwide on electronic applications and large-scale applications with HTS filter subsystems based on  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (YBCO) having already been commercialized [1]<sup>1</sup>.

The merits of using HTS films for microwave devices such as resonators, filters, antennas, delay lines, etc., include i) possibility of microwave losses from HTS films being extremely low and ii) no signal dispersion on transmission lines made of HTS films due to extremely low microwave surface resistance ( $R_S$ ) [2] and frequency-independent penetration depth ( $\lambda$ ) of HTS films, respectively.

In this regard, when it comes to designing HTS-based microwave devices, it is important to measure the surface impedance ( $Z_S$ ) of HTS films with  $Z_S = R_S + jX_S$  and  $X_S = \omega\mu_0\lambda$  (here  $\omega$  and  $\mu_0$  denote the angular frequency and the permeability of vacuum, respectively,  $X_S$ , the surface reactance, and  $X_S = \omega\mu_0\lambda$  is valid at temperatures not too close to the critical temperature  $T_C$  of HTS films).

Various reports have been made on measuring the  $R_S$  of HTS films at microwave frequencies with the typical  $R_S$  of HTS films as low as 1/100 - 1/50 of that of oxygen-free high-purity copper (OFHC) at 77 K and 10 GHz. The  $R_S$  of conventional superconductors such as niobium (Nb) could be easily measured by using Nb cavities by converting the resonator quality factor ( $Q$ ) to the  $R_S$  of Nb. However, such conventional measurement method could no longer be applied to HTS films grown on dielectric substrates, with which it is basically impossible to make all-HTS cavities. Instead, for measuring the  $R_S$  of HTS films, several other methods have been useful, which include the microstrip resonator method [3], the coplanar microstrip resonator method [4], the parallel plate resonator method [5] and the dielectric resonator method [7-10]. Among the stated methods, the dielectric resonator method has been very useful due to that the method enables to measure the  $R_S$  in a non-invasive way and with accuracy. 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 not only of the intrinsic surface resistance but also the intrinsic surface reactance of HTS films, regardless of the film's thickness, by using a single sapphire resonator that differs from the existing IEC standard (IEC 61788-7:2006), which is limited to measuring the surface resistance of superconductor films having a thicknesses of more than  $3\lambda$  at the measured temperature by using two sapphire resonators. In fact, the measured surface resistances of HTS films with different thicknesses of less than  $3\lambda$  mean effective values instead of intrinsic values, which cannot be used for directly comparing the microwave properties of HTS films among one another [12, 13]. Use of a single sapphire resonator as suggested in this standard also 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 test method given in this standard can also be applied to HTS coated conductors, HTS bulks and other superconductors having established models for the penetration depth.

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

The test method covered in this standard has been discussed at the VAMAS (Versailles Project on Advanced Materials and Standards) TWA-16 meeting.

---

<sup>1</sup> Numerals in square brackets refer to the Bibliography.

## SUPERCONDUCTIVITY –

### Part 15: Electronic characteristic measurements – Intrinsic surface impedance of superconductor films at microwave frequencies

#### 1 Scope

This part of IEC 61788 describes measurements of the intrinsic surface impedance ( $Z_S$ ) of HTS films at microwave frequencies by a modified two-resonance mode dielectric resonator method [13, 14]<sup>2</sup>. The object of measurement is to obtain the temperature dependence of the intrinsic  $Z_S$  at the resonant frequency  $f_0$ .

The frequency and thickness range and the measurement resolution for the intrinsic  $Z_S$  of HTS films are as follows:

- frequency: up to 40 GHz;
- film thickness: greater than 50 nm;
- measurement resolution: 0,01 mΩ at 10 GHz.

The intrinsic  $Z_S$  data at the measured frequency, and that scaled to 10 GHz, assuming the  $f^2$  rule for the intrinsic surface resistance  $R_S$  ( $f < 40$  GHz) and the  $f$  rule for the intrinsic surface reactance  $X_S$  for comparison, shall be reported.

#### 2 Normative references

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

IEC 60050-815:2000, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 815: Superconductivity*

IEC 61788-7:2006, *Superconductivity – Part 7: Electronic characteristic measurements – Surface resistance of superconductors at microwave frequencies*

---

<sup>2</sup> Numerals in square brackets refer to the Bibliography.

## SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	50
INTRODUCTION.....	52
1 Domaine d'application .....	54
2 Références normatives.....	54
3 Termes et définitions .....	54
4 Exigences.....	55
5 Appareillage .....	56
5.1 Équipement de mesure.....	56
5.2 Appareillage de mesure.....	56
5.3 Tiges diélectriques .....	61
5.4 Films supraconducteurs et cavité de cuivre .....	62
6 Procédure de mesure .....	62
6.1 Installation .....	62
6.2 Mesure du niveau de référence .....	62
6.3 Mesure de la résistance $R_S$ du cuivre de haute pureté sans oxygène .....	63
6.4 Détermination de la résistance efficace $R_S$ des films supraconducteurs et de $\tan\delta$ des tiges diélectriques normalisées .....	65
6.5 Détermination de la profondeur de pénétration .....	66
6.6 Détermination de l'impédance de surface intrinsèque .....	68
7 Incertitude de la méthode d'essai .....	69
7.1 Mesure du facteur de qualité à l'état déchargé .....	69
7.2 Mesure de la tangente de perte .....	69
7.3 Température.....	70
7.4 Structure du support de l'éprouvette et du porte-éprouvette .....	70
8 Rapport d'essai .....	70
8.1 Identification de l'éprouvette d'essai.....	70
8.2 Rapport relatif aux valeurs de l'impédance intrinsèque $Z_S$ .....	70
8.3 Rapport relatif aux conditions d'essai .....	71
Annexe A (informative) Informations complémentaires relatives aux Articles 1 à 8.....	72
Annexe B (informative) Considérations relatives à l'incertitude .....	90
Bibliographie.....	95
Figure 1 – Schéma de principe pour l'équipement de mesure de l'impédance intrinsèque $Z_S$ des films HTS aux températures cryogéniques .....	57
Figure 2 – Schéma de principe d'un résonateur diélectrique avec un commutateur pour la connexion thermique .....	58
Figure 3 – Résonateur diélectrique type avec une plaque supérieure mobile.....	59
Figure 4 – Bloc-commutateurs pour la connexion thermique .....	60
Figure 5 – Résonateur diélectrique assemblé avec un bloc-commutateurs pour la connexion thermique.....	61
Figure 6 – Crête de résonance type. L'affaiblissement d'insertion $IA$ , la fréquence de résonance $f_0$ et la largeur de bande à la moitié de la puissance $\Delta f_{3dB}$ sont définis.....	64
Figure 7 – Paramètres de dispersion en réflexion $S_{11}$ et $S_{22}$ .....	66
Figure 8 – Définitions des termes utilisés dans le Tableau 5.....	70
Figure A.1 – Schéma de principe pour le système de mesure .....	72



Figure A.2 – Étage de mouvement utilisant des moteurs pas-à-pas .....	73
Figure A.3 – Vue en coupe d'un résonateur diélectrique .....	74
Figure A.4 – Schéma pour une vue en coupe simplifiée d'un résonateur diélectrique .....	78
Figure A.5 – Graphe de modes pour un résonateur saphir .....	82
Figure A.6 – Réponse en fréquence du résonateur saphir .....	83
Figure A.7 – $Q_U$ en fonction de la température pour les modes $TE_{021}$ et $TE_{012}$ du résonateur saphir avec des films de YBCO de 360 nm d'épaisseur .....	84
Figure A.8 – Fréquence de résonance $f_0$ en fonction de la température pour les modes $TE_{021}$ et $TE_{012}$ du résonateur saphir avec des films de YBCO de 360 nm d'épaisseur .....	84
Figure A.9 – Dépendance vis-à-vis de la température de la résistance $R_{Se}$ des films de YBCO avec les épaisseurs de 70 nm à 360 nm mesurée à environ 40 GHz .....	85
Figure A.10 – Dépendance vis-à-vis de la température de $\Delta\lambda_e$ pour les films de YBCO avec des épaisseurs de 70 nm et de 360 nm mesurées à environ 40 GHz .....	85
Figure A.11 – Profondeurs de pénétration $\lambda$ du film de YBCO de 360 nm d'épaisseur mesuré à 10 kHz en utilisant la méthode d'inductance mutuelle et à environ 40 GHz en utilisant un résonateur saphir .....	86
Figure A.12 – Dépendance vis-à-vis de la température de la résistance de surface intrinsèque $R_S$ de films de YBCO avec les épaisseurs de 70 nm à 360 nm mesurées à environ 40 GHz .....	86
Figure A.13 – Comparaison de la valeur dépendant de la température de chaque terme dans l'Équation (A.35) pour le mode $TE_{021}$ du résonateur saphir normalisé .....	87
Figure A.14 – Comparaison de la valeur dépendant de la température de chaque terme dans l'Équation (A.35) pour le mode $TE_{012}$ du résonateur saphir normalisé .....	87
Figure A.15 – Dépendance vis-à-vis de la température de l'incertitude sur la valeur mesurée de la résistance intrinsèque $R_S$ des films de YBCO .....	88
Tableau 1 – Dimensions types d'une tige de saphir .....	62
Tableau 2 – Dimensions types des cavités de cuivre OFHC et des films HTS .....	62
Tableau 3 – Facteurs géométriques et facteurs de remplissage calculés pour le résonateur saphir normalisé .....	65
Tableau 4 – Spécifications de l'analyseur de réseau vectoriel .....	69
Tableau 5 – > Incertitude de type B pour les spécifications relatives à la tige de saphir .....	69
Tableau A.1 – Facteurs géométriques et facteurs de remplissage calculés pour le résonateur saphir normalisé .....	79
Tableau B.1 – Signaux de sortie de deux extensomètres nominalement identiques .....	91
Tableau B.2 – Valeurs moyennes de deux signaux de sortie .....	91
Tableau B.3 – Écarts types expérimentaux de deux signaux de sortie .....	91
Tableau B.4 – Incertitudes-types de deux signaux de sortie .....	92
Tableau B.5 – Coefficients de variation de deux signaux de sortie .....	92

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**SUPRACONDUCTIVITÉ –**

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

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 61788-15 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
90/280/FDIS	90/283/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 de supraconducteurs à haute température critique  $T_C$  (HTS), des travaux de recherche approfondie ont été réalisés dans le monde entier sur les applications électroniques et les applications à grande échelle avec les sous-systèmes de filtres HTS basés sur  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (YBCO) déjà commercialisés [1]<sup>1</sup>.

Les avantages des films HTS pour les dispositifs micro-ondes tels que les résonateurs, filtres, antennes, lignes à retard, etc., comprennent i) un niveau de pertes micro-ondes des films HTS pouvant être extrêmement bas et ii) l'absence de dispersion de signal sur les lignes de transmission fabriquées à partir de films HTS en raison de la résistance extrêmement faible de la surface aux micro-ondes ( $R_S$ ) [2] et de la profondeur de pénétration indépendante de la fréquence ( $\lambda$ ) des films HTS.

À cet égard, lorsqu'il s'agit de la conception des dispositifs micro-ondes à base de HTS, il est important de mesurer l'impédance de surface ( $Z_S$ ) des films HTS avec  $Z_S = R_S + jX_S$  et  $X_S = \omega\mu_0\lambda$  (ici,  $\omega$  et  $\mu_0$  désignent respectivement la fréquence angulaire et la perméabilité du vide,  $X_S$  désigne la réactance de surface, l'équation  $X_S = \omega\mu_0\lambda$  étant valide à des températures pas trop proches de la température critique  $T_C$  des films HTS).

Diverses communications ont été rapportées en ce qui concerne la mesure de la résistance  $R_S$  des films HTS aux fréquences micro-ondes, la résistance  $R_S$  des films HTS ayant des valeurs aussi faibles que 1/100 à 1/50 de celle du cuivre de haute pureté sans oxygène (OFHC, oxygen-free high-purity copper) à 77 K et 10 GHz. La résistance  $R_S$  des supraconducteurs conventionnels tels que le niobium (Nb) peut être facilement mesurée en utilisant des cavités de Nb et en convertissant le facteur de qualité du résonateur ( $Q$ ) en la résistance  $R_S$  du Nb. Cependant, une telle méthode de mesure conventionnelle ne pouvait plus être appliquée à des films HTS cultivés sur des substrats diélectriques, avec lesquels il est en fait impossible de pratiquer des cavités tout HTS. À la place, pour mesurer la résistance  $R_S$  des films HTS, plusieurs autres méthodes se sont avérées utiles, notamment la méthode du résonateur microruban [3], la méthode du résonateur microruban coplanaire [4], la méthode du résonateur à plaques parallèles [5] et la méthode du résonateur diélectrique [7 à 10]. Parmi les méthodes énoncées, la méthode du résonateur diélectrique a été très utile car elle permet de mesurer la résistance  $R_S$  de manière non invasive et avec une grande précision. En 2002, la Commission Électrotechnique Internationale (CEI) a publié la méthode du résonateur diélectrique comme une norme de mesure [11].

La méthode d'essai donnée dans la présente norme permet de mesurer non seulement la résistance de surface intrinsèque mais aussi la réactance de surface intrinsèque des films HTS, quelle que soit l'épaisseur de ces films, en utilisant un seul résonateur saphir, ce qui diffère de la norme CEI existante (CEI 61788-7:2006) qui se limite à mesurer la résistance de surface des films supraconducteurs ayant une épaisseur de plus de  $3\lambda$  à la température mesurée à l'aide de deux résonateurs saphir. En fait, les résistances de surface mesurées des films HTS de différentes épaisseurs inférieures à  $3\lambda$  correspondent à des valeurs effectives au lieu de valeurs intrinsèques, qui ne peuvent pas être utilisées pour comparer directement les propriétés micro-ondes des films HTS les uns des autres [12, 13]. L'utilisation d'un seul résonateur saphir telle que suggérée dans la présente norme permet aussi de réduire l'incertitude affectant la valeur mesurée de la résistance de surface qui pourrait résulter de l'utilisation de deux résonateurs saphir avec des tiges de saphir de qualité même légèrement différente.

La méthode d'essai donnée dans la présente norme peut aussi être appliquée aux conducteurs revêtus de HTS, aux substrats HTS et autres supraconducteurs ayant des modèles bien établis pour la profondeur de pénétration.

---

<sup>1</sup> Les nombres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

La présente norme vise à fournir une base technique appropriée et acceptable à l'heure actuelle aux ingénieurs travaillant dans les domaines de l'électronique et de la technologie de la supraconductivité.

La méthode d'essai couverte dans la présente norme a été débattue à la rencontre VAMAS (Versailles Project on Advanced Materials and Standards) TWA-16.

## SUPRACONDUCTIVITÉ –

### Partie 15: Mesures de caractéristiques électroniques – Impédance de surface intrinsèque de films supraconducteurs aux fréquences micro-ondes

#### 1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 61788 décrit les mesures de l'impédance de surface intrinsèque ( $Z_S$ ) des films HTS aux fréquences micro-ondes par une méthode modifiée du résonateur diélectriques en mode deux résonances [13, 14]<sup>2</sup>. L'objet de la mesure est d'obtenir la dépendance de l'impédance intrinsèque  $Z_S$  vis-à-vis de la température à la fréquence de résonance  $f_0$ .

La plage de fréquences et d'épaisseurs et la résolution de mesure pour l'impédance intrinsèque  $Z_S$  des films HTS sont comme suit:

- fréquence: jusqu'à 40 GHz;
- épaisseur de film: supérieure à 50 nm;
- résolution de mesure: 0,01 mΩ à 10 GHz.

Les données d'impédance intrinsèque  $Z_S$  à la fréquence mesurée et celles normalisées à 10 GHz, en admettant la règle  $f^2$  pour la résistance de surface intrinsèque  $R_S$  ( $f < 40$  GHz) et la règle  $f$  pour la réactance de surface intrinsèque  $X_S$  dans un but de comparaison, doivent être consignées dans un rapport.

#### 2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

CEI 60050-815:2000, *Vocabulaire Électrotechnique International – Partie 815: Supraconductivité*

CEI 61788-7:2006, *Superconductivity – Part 7: Electronic characteristic measurements – Surface resistance of superconductors at microwave frequencies* (Disponible en anglais seulement)

---

<sup>2</sup> Les nombres entre crochets renvoient à la Bibliographie.