



# INTERNATIONAL STANDARD

# NORME INTERNATIONALE



## Superconductivity –

**Part 17: Electronic characteristic measurements – Local critical current density and its distribution in large-area superconducting films**

## Supraconductivité –

**Partie 17: Mesures de caractéristiques électroniques – Densité de courant critique local et sa distribution dans les films supraconducteurs de grande surface**

INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

COMMISSION  
ELECTROTECHNIQUE  
INTERNATIONALE

PRICE CODE  
CODE PRIX



ICS 17.220.20; 29.050

ISBN 978-2-83220-583-9

**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.....	8
2 Normative reference.....	8
3 Terms and definitions.....	8
4 Requirements.....	9
5 Apparatus.....	9
5.1 Measurement equipment.....	9
5.2 Components for inductive measurements.....	10
5.2.1 Coils.....	10
5.2.2 Spacer film.....	11
5.2.3 Mechanism for the set-up of the coil.....	11
5.2.4 Calibration wafer.....	11
6 Measurement procedure.....	12
6.1 General.....	12
6.2 Determination of the experimental coil coefficient.....	12
6.2.1 Calculation of the theoretical coil coefficient $k$ .....	12
6.2.2 Transport measurements of bridges in the calibration wafer.....	13
6.2.3 $U_3$ measurements of the calibration wafer.....	13
6.2.4 Calculation of the $E$ - $J$ characteristics from frequency-dependent $I_{th}$ data.....	13
6.2.5 Determination of the $k'$ from $J_{ct}$ and $J_{c0}$ values for an appropriate $E$ .....	14
6.3 Measurement of $J_c$ in sample films.....	15
6.4 Measurement of $J_c$ with only one frequency.....	15
6.5 Examples of the theoretical and experimental coil coefficients.....	16
7 Uncertainty in the test method.....	17
7.1 Major sources of systematic effects that affect the $U_3$ measurement.....	17
7.2 Effect of deviation from the prescribed value in the coil-to-film distance.....	18
7.3 Uncertainty of the experimental coil coefficient and the obtained $J_c$ .....	18
7.4 Effects of the film edge.....	19
7.5 Specimen protection.....	19
8 Test report.....	19
8.1 Identification of test specimen.....	19
8.2 Report of $J_c$ values.....	19
8.3 Report of test conditions.....	19
Annex A (informative) Additional information relating to Clauses 1 to 8.....	20
Annex B (informative) Optional measurement systems.....	26
Annex C (informative) Uncertainty considerations.....	32
Annex D (informative) Evaluation of the uncertainty.....	37
Bibliography.....	43
Figure 1 – Diagram for an electric circuit used for inductive $J_c$ measurement of HTS films.....	10
Figure 2 – Illustration showing techniques to press the sample coil to HTS films.....	11
Figure 3 – Example of a calibration wafer used to determine the coil coefficient.....	12

Figure 4 – Illustration for the sample coil and the magnetic field during measurement.....	13
Figure 5 – $E$ - $J$ characteristics measured by a transport method and the $U_3$ inductive method .....	14
Figure 6 –Example of the normalized third-harmonic voltages ( $U_3/fI_0$ ) measured with various frequencies.....	15
Figure 7 – Illustration for coils 1 and 3 in Table 1.....	16
Figure 8 – The coil-factor function $F(r) = 2H_0/I_0$ calculated for the three coils.....	17
Figure 9 – The coil-to-film distance $Z_1$ dependence of the theoretical coil coefficient $k$ .....	18
Figure A.1 – Illustration for the sample coil and the magnetic field during measurement .....	22
Figure A.2 – (a) $U_3$ and (b) $U_3/I_0$ plotted against $I_0$ in a YBCO thin film measured in applied DC magnetic fields, and the scaling observed when normalized by $I_{th}$ (insets).....	23
Figure B.1 – Schematic diagram for the variable-RL-cancel circuit.....	27
Figure B.2 – Diagram for an electrical circuit used for the 2-coil method .....	27
Figure B.3 – Harmonic noises arising from the power source .....	28
Figure B.4 – Noise reduction using a cancel coil with a superconducting film.....	28
Figure B.5 – Normalized harmonic noises ( $U_3/fI_0$ ) arising from the power source .....	29
Figure B.6 – Normalized noise voltages after the reduction using a cancel coil with a superconducting film.....	29
Figure B.7 – Normalized noise voltages after the reduction using a cancel coil without a superconducting film.....	30
Figure B.8 – Normalized noise voltages with the 2-coil system shown in Figure B.2.....	30
Figure D.1 – Effect of the coil position against a superconducting thin film on the measured $J_c$ values .....	41
Table 1 – Specifications and coil coefficients of typical sample coils.....	16
Table C.1 – Output signals from two nominally identical extensometers.....	33
Table C.2 – Mean values of two output signals .....	33
Table C.3 – Experimental standard deviations of two output signals .....	33
Table C.4 – Standard uncertainties of two output signals .....	34
Table C.5 – Coefficient of variations of two output signals .....	34
Table D.1 – Uncertainty budget table for the experimental coil coefficient $k'$ .....	37
Table D.2 – Examples of repeated measurements of $J_c$ and $n$ -values .....	40

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

### SUPERCONDUCTIVITY –

#### **Part 17: Electronic characteristic measurements – Local critical current density and its distribution in large-area superconducting films**

#### 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.

International Standard IEC 61788-17 has been prepared by IEC technical committee 90: Superconductivity.

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

FDIS	Report on voting
90/310/FDIS	90/319/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 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

Over twenty years after their discovery in 1986, high-temperature superconductors are now finding their way into products and technologies that will revolutionize information transmission, transportation, and energy. Among them, high-temperature superconducting (HTS) microwave filters, which exploit the extremely low surface resistance of superconductors, have already been commercialized. They have two major advantages over conventional non-superconducting filters, namely: low insertion loss (low noise characteristics) and high frequency selectivity (sharp cut) [1]<sup>1</sup>. These advantages enable a reduced number of base stations, improved speech quality, more efficient use of frequency bandwidths, and reduced unnecessary radio wave noise.

Large-area superconducting thin films have been developed for use in microwave devices [2]. They are also used for emerging superconducting power devices, such as, resistive-type superconducting fault-current limiters (SFCLs) [3–5], superconducting fault detectors used for superconductor-triggered fault current limiters [6, 7] and persistent-current switches used for persistent-current HTS magnets [8, 9]. The critical current density  $J_c$  is one of the key parameters that describe the quality of large-area HTS films. Nondestructive, AC inductive methods are widely used to measure  $J_c$  and its distribution for large-area HTS films [10–13], among which the method utilizing third-harmonic voltages  $U_3 \cos(3\omega t + \theta)$  is the most popular [10, 11], where  $\omega$ ,  $t$  and  $\theta$  denote the angular frequency, time, and initial phase, respectively. However, these conventional methods are not accurate because they have not considered the electric-field  $E$  criterion of the  $J_c$  measurement [14, 15] and sometimes use an inappropriate criterion to determine the threshold current  $I_{th}$  from which  $J_c$  is calculated [16]. A conventional method can obtain  $J_c$  values that differ from the accurate values by 10 % to 20 % [15]. It is thus necessary to establish standard test methods to precisely measure the local critical current density and its distribution, to which all involved in the HTS filter industry can refer for quality control of the HTS films. Background knowledge on the inductive  $J_c$  measurements of HTS thin films is summarized in Annex A.

In these inductive methods, AC magnetic fields are generated with AC currents  $I_0 \cos \omega t$  in a small coil mounted just above the film, and  $J_c$  is calculated from the threshold coil current  $I_{th}$ , at which full penetration of the magnetic field to the film is achieved [17]. For the inductive method using third-harmonic voltages  $U_3$ ,  $U_3$  is measured as a function of  $I_0$ , and the  $I_{th}$  is determined as the coil current  $I_0$  at which  $U_3$  starts to emerge. The induced electric fields  $E$  in the superconducting film at  $I_0 = I_{th}$ , which are proportional to the frequency  $f$  of the AC current, can be estimated by a simple Bean model [14]. A standard method has been proposed to precisely measure  $J_c$  with an electric-field criterion by detecting  $U_3$  and obtaining the  $n$ -value (index of the power-law  $E$ - $J$  characteristics) by measuring  $I_{th}$  precisely at various frequencies [14, 15, 18, 19]. This method not only obtains precise  $J_c$  values, but also facilitates the detection of degraded parts in inhomogeneous specimens, because the decline of  $n$ -value is more remarkable than the decrease of  $J_c$  in such parts [15]. It is noted that this standard method is excellent for assessing homogeneity in large-area HTS films, although the relevant parameter for designing microwave devices is not  $J_c$ , but the surface resistance. For application of large-area superconducting thin films to SFCLs, knowledge on  $J_c$  distribution is vital, because  $J_c$  distribution significantly affects quench distribution in SFCLs during faults.

The International Electrotechnical Commission (IEC) draws attention to the fact that it is claimed that compliance with this document may involve the use of a patent concerning the determination of the  $E$ - $J$  characteristics by inductive  $J_c$  measurements as a function of frequency, given in the Introduction, Clause 1, Clause 4 and 5.1.

IEC takes no position concerning the evidence, validity and scope of this patent right.

The holder of this patent right has assured the IEC that he is willing to negotiate licenses free of charge with applicants throughout the world. In this respect, the statement of the holder of this patent right is registered with the IEC. Information may be obtained from:

---

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

Name of holder of patent right:

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Address:

Intellectual Property Planning Office, Intellectual Property Department  
1-1-1, Umezono, Tsukuba, Ibaraki Prefecture, Japan

Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this document may be subject to patent rights other than those identified above. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

ISO ([www.iso.org/patents](http://www.iso.org/patents)) and IEC (<http://patents.iec.ch>) maintain on-line data bases of patents relevant to their standards. Users are encouraged to consult the data bases for the most up to date information concerning patents.

## SUPERCONDUCTIVITY –

### Part 17: Electronic characteristic measurements – Local critical current density and its distribution in large-area superconducting films

#### 1 Scope

This part of IEC 61788 describes the measurements of the local critical current density ( $J_c$ ) and its distribution in large-area high-temperature superconducting (HTS) films by an inductive method using third-harmonic voltages. The most important consideration for precise measurements is to determine  $J_c$  at liquid nitrogen temperatures by an electric-field criterion and obtain current-voltage characteristics from its frequency dependence. Although it is possible to measure  $J_c$  in applied DC magnetic fields [20, 21]<sup>2</sup>, the scope of this standard is limited to the measurement without DC magnetic fields.

This technique intrinsically measures the critical sheet current that is the product of  $J_c$  and the film thickness  $d$ . The range and measurement resolution for  $J_c d$  of HTS films are as follows:

- $J_c d$ : from 200 A/m to 32 kA/m (based on results, not limitation);
- Measurement resolution: 100 A/m (based on results, not limitation).

#### 2 Normative reference

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.org>>)

---

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



## SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	48
INTRODUCTION.....	50
1 Domaine d'application .....	52
2 Référence normative .....	52
3 Termes et définitions .....	52
4 Exigences.....	53
5 Appareillage .....	54
5.1 Matériel de mesure.....	54
5.2 Composants pour les mesures inductives.....	55
5.2.1 Bobines .....	55
5.2.2 Film d'espacement.....	55
5.2.3 Mécanisme pour la mise en place de la bobine.....	55
5.2.4 Plaquette d'étalonnage .....	56
6 Procédure de mesure .....	57
6.1 Généralités.....	57
6.2 Détermination du coefficient de bobine expérimental.....	57
6.2.1 Calcul du coefficient de bobine théorique $k$ .....	57
6.2.2 Mesures de transport des ponts dans la plaquette d'étalonnage .....	58
6.2.3 Mesures de $U_3$ de la plaquette d'étalonnage.....	58
6.2.4 Calcul des caractéristiques $E$ - $J$ d'après les données de $I_{th}$ en fonction de la fréquence .....	58
6.2.5 Détermination de $k'$ d'après les valeurs de $J_{ct}$ et $J_{c0}$ pour un $E$ approprié.....	59
6.3 Mesure de $J_c$ dans des films d'échantillon .....	60
6.4 Mesure de $J_c$ à une seule fréquence .....	60
6.5 Exemples de coefficients de bobine théoriques et expérimentaux.....	61
7 Incertitude de la méthode d'essai .....	62
7.1 Sources majeures d'effets systématiques influant sur la mesure de $U_3$ .....	62
7.2 Effet d'un écart par rapport à la valeur prescrite dans la distance bobine-film.....	63
7.3 Incertitude du coefficient de bobine expérimental et de la $J_c$ obtenue.....	64
7.4 Effets du bord du film .....	64
7.5 Protection de l'éprouvette.....	65
8 Compte rendu d'essai.....	65
8.1 Identification de l'éprouvette d'essai.....	65
8.2 Compte-rendu des valeurs de $J_c$ .....	65
8.3 Compte rendu des conditions d'essai .....	65
Annexe A (informative) Informations complémentaires concernant les Articles 1 à 8.....	66
Annexe B (informative) Systèmes de mesure facultatifs .....	73
Annexe C (informative) Considérations relatives à l'incertitude .....	80
Annexe D (informative) Évaluation de l'incertitude .....	85
Bibliographie.....	92
Figure 1 – Schéma d'un circuit électrique utilisé pour la mesure inductive de $J_c$ de films HTS.....	55

Figure 2 – Illustration montrant des techniques de pression de la bobine d'échantillon sur des films HTS .....	56
Figure 3 – Exemple de plaquette d'étalonnage utilisée pour déterminer le coefficient de bobine.....	57
Figure 4 – Illustration de la bobine d'échantillon et du champ magnétique pendant une mesure .....	58
Figure 5 – Caractéristiques $E$ - $J$ mesurées par une méthode de transport et la méthode $U_3$ inductive .....	59
Figure 6 – Exemple de tensions de troisième harmonique normalisées ( $U_3/I_0$ ) mesurées à diverses fréquences.....	60
Figure 7 – Illustration pour les bobines 1 et 3 du Tableau 1 .....	62
Figure 8 – Fonction de facteur de bobine $F(r) = 2H_0/I_0$ calculée pour les trois bobines.....	62
Figure 9 – Dépendance par rapport à la distance bobine-film $Z_1$ du coefficient de bobine théorique $k$ .....	64
Figure A.1 – Illustration de la bobine d'échantillon et du champ magnétique pendant la mesure .....	68
Figure A.2 – (a) $U_3$ et (b) $U_3/I_0$ tracées par rapport à un film mince en YBCO, mesurée dans les champs magnétiques en courant continu appliqués et changement d'échelle observé avec normalisation par $I_{th}$ (encarts) .....	70
Figure B.1 – Dessin schématique du circuit d'annulation à RL variable .....	74
Figure B.2 – Schéma d'un circuit électrique utilisant la méthode à 2 bobines .....	74
Figure B.3 – Bruits des harmoniques provenant de la source d'alimentation .....	75
Figure B.4 – Réduction du bruit en utilisant une bobine d'annulation avec un film supraconducteur .....	76
Figure B.5 – Bruits des harmoniques normalisés ( $U_3/I_0$ ) provenant de la source d'alimentation .....	77
Figure B.6 – Tensions de bruit normalisées après réduction utilisant une bobine d'annulation avec un film supraconducteur.....	77
Figure B.7 – Tensions de bruit normalisées après réduction utilisant une bobine d'annulation sans film supraconducteur .....	78
Figure B.8 – Tensions de bruit normalisées avec le système à 2 bobines représenté à la Figure B.2.....	78
Figure D.1 – Effet de la position de la bobine contre un film mince supraconducteur sur les valeurs de $J_c$ mesurées .....	90
Tableau 1 – Spécifications et coefficients de bobine de bobines d'échantillon types .....	61
Tableau C.1 – Signaux de sortie de deux extensomètres nominalement identiques .....	81
Tableau C.2 – Valeurs moyennes de deux signaux de sortie.....	81
Tableau C.3 – Écarts types expérimentaux de deux signaux de sortie .....	81
Tableau C.4 – Incertitudes type de deux signaux de sortie.....	82
Tableau C.5 – Coefficient de variation de deux signaux de sortie.....	82
Tableau D.1 – Tableau de bilan d'incertitude pour le coefficient de bobine expérimental $k'$ .....	86
Tableau D.2 – Exemples de mesures répétées de $J_c$ et de valeurs $n$ .....	88

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

### SUPRACONDUCTIVITÉ –

#### **Partie 17: Mesures de caractéristiques électroniques – Densité de courant critique local et sa distribution dans les films supraconducteurs de grande surface**

#### 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.

La Norme internationale CEI 61788-17 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
90/310/FDIS	90/319/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

Plus de vingt ans après avoir été découverts, en 1986, les supraconducteurs à haute température ont fini par s'introduire dans des produits et des technologies qui vont révolutionner la transmission d'informations, le transport et l'énergie. Parmi ceux-ci, des filtres micro-ondes à supraconducteurs à haute température (HTS, en anglais «high-temperature superconducting») ont déjà été commercialisés, exploitant la résistance de surface extrêmement faible des supraconducteurs. Ils présentent deux avantages majeurs par rapport aux filtres classiques sans supraconducteur, à savoir: un faible affaiblissement d'insertion (caractéristiques de faible bruit) et une grande sélectivité en fréquence (coupure brutale) [1]<sup>1</sup>. Ces avantages ont pour conséquence un nombre réduit de stations de base, une amélioration de la qualité de la parole, une utilisation plus efficace des largeurs de bande de fréquence et une diminution du bruit inutile des ondes radio.

Des films minces à supraconducteurs de grande surface ont été réalisés pour être utilisés dans des dispositifs à micro-ondes [2]. Ils sont également utilisés pour les dispositifs de puissance à supraconducteurs émergents, tels que les limiteurs de courant de défaut à supraconducteur de type résistif (SFCL) [3–5], les détecteurs de défaut à supraconducteur utilisés pour les limiteurs de courant de défaut déclenchés par supraconduction [6, 7] et les interrupteurs de courant électrique persistant utilisés pour les aimants HTS à courant persistant [8, 9]. La densité de courant critique  $J_c$  est l'un des paramètres fondamentaux décrivant la qualité des films HTS de grande surface. On a largement utilisé des méthodes inductives non destructives en courant alternatif pour mesurer  $J_c$  et sa distribution pour les films HTS de grande surface [10-13], parmi lesquelles, la méthode utilisant les tensions de troisième harmonique  $U_3 \cos(3\omega t + \theta)$  est la plus répandue [10-11], où  $\omega$ ,  $t$  et  $\theta$  représentent respectivement la fréquence angulaire, le temps et la phase initiale. Ces méthodes classiques ne sont toutefois pas précises car elles ne tiennent pas compte du critère de champ électrique  $E$  de la mesure de  $J_c$  [14, 15] et utilisent parfois un critère inapproprié pour déterminer le courant de seuil  $I_{th}$  d'après lequel est calculée  $J_c$  [16]. Une méthode classique permet d'obtenir des valeurs de  $J_c$  qui diffèrent de 10 % à 20 % des valeurs précises [15]. Il est donc nécessaire de déterminer des méthodes d'essais normalisées pour mesurer précisément la densité de courant critique local et sa distribution, auxquelles peut se référer tout ce qui concerne l'industrie des filtres HTS pour le contrôle de la qualité des films HTS. Les connaissances acquises dans le domaine des mesures de  $J_c$  inductives des films HTS minces sont résumées à l'Annexe A

Dans ces méthodes inductives, des champs magnétiques en courant alternatif sont générés avec des courants alternatifs  $I_0 \cos \omega t$  dans une petite bobine montée juste au-dessus du film et  $J_c$  est calculée d'après le courant de seuil de la bobine  $I_{th}$ , pour lequel on obtient une pénétration complète du champ magnétique dans le film [17]. En ce qui concerne la méthode inductive utilisant les tensions de troisième harmonique  $U_3$ ,  $U_3$  est mesurée en fonction de  $I_0$ , et  $I_{th}$  est déterminé en tant que courant de bobine  $I_0$  auquel  $U_3$  commence à apparaître. Les champs électriques induits  $E$  dans le film supraconducteur à  $I_0 = I_{th}$ , qui sont proportionnels à la fréquence  $f$  du courant alternatif, peuvent être estimés par un simple modèle de Bean [14]. Une méthode normalisée a été proposée pour mesurer précisément  $J_c$  avec un critère de champ électrique par détection de  $U_3$  et obtention de la valeur  $n$  (indice des caractéristiques de la loi de puissance  $E$ - $J$ ) par une mesure précise de  $I_{th}$  à diverses fréquences [14, 15, 18, 19]. Non seulement cette méthode permet d'obtenir des valeurs précises de  $J_c$ , mais elle facilite également la détection des parties dégradées dans des éprouvettes inhomogènes, car la diminution de la valeur  $n$  est plus remarquable que la diminution de  $J_c$  dans ces parties [15]. On note que cette méthode normalisée est excellente pour évaluer l'homogénéité dans des films HTS de grande surface, bien que le paramètre approprié pour concevoir des dispositifs à micro-ondes ne soit pas  $J_c$ , mais la résistance surfacique. Pour une application de films minces supraconducteurs de grande surface à des SFCL, la connaissance de la distribution de  $J_c$  est fondamentale, car la distribution de  $J_c$  a une influence significative sur la distribution de l'extinction dans les SFCL en cas de défaut.

---

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

La Commission Électrotechnique Internationale (CEI) attire l'attention sur le fait qu'il est déclaré que la conformité avec les dispositions du présent document peut impliquer l'utilisation d'un brevet intéressant la détermination des caractéristiques  $E-J$  par les mesures des  $J_c$  inductives en fonction de la fréquence traitée l'Introduction, l'Article 1, l'Article 4 en 5.1.

La CEI ne prend pas position quant à la preuve, la validité et la portée de ces droits de propriété.

Le détenteur de ces droits de propriété a donné l'assurance à la CEI qu'il consent à négocier des licences sans frais avec des demandeurs du monde entier. À ce propos, la déclaration du détenteur des droits de propriété est enregistrée à la CEI. Des informations peuvent être demandées à:

Nom du détenteur du droit de propriété:  
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Adresse:  
Intellectual Property Planning Office, Intellectual Property Department  
1-1-1, Umezono, Tsukuba, Ibaraki Prefecture, Japon

L'attention est d'autre part attirée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété autres que ceux qui ont été mentionnés ci-dessus. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de l'identification de ces droits de propriété en tout ou partie.

L'ISO ([www.iso.org/patents](http://www.iso.org/patents)) et la CEI (<http://patents.iec.ch>) maintiennent des bases de données, consultables en ligne, des droits de propriété pertinents à leurs normes. Les utilisateurs sont encouragés à consulter ces bases de données pour obtenir l'information la plus récente concernant les droits de propriété.

## SUPRACONDUCTIVITÉ –

### Partie 17: Mesures de caractéristiques électroniques – Densité de courant critique local et sa distribution dans les films supraconducteurs de grande surface

#### 1 Domaine d'application

Cette partie de la CEI 61788 décrit les mesures de la densité de courant critique local ( $J_c$ ) et sa distribution dans les films supraconducteurs à haute température (HTS) de grande surface par une méthode inductive utilisant les tensions de troisième harmonique. La considération la plus importante pour effectuer des mesures précises consiste à déterminer  $J_c$  aux températures de l'azote liquide au moyen d'un critère de champ électrique et obtenir des caractéristiques courant-tension d'après sa dépendance vis-à-vis de la fréquence. Bien qu'il soit possible de mesurer  $J_c$  dans des champs magnétiques en courant continu appliqués [20, 21]<sup>2</sup>, le domaine d'application de la présente norme est limité à la mesure sans champ magnétique en courant continu.

Cette technique mesure de façon intrinsèque le courant de feuille critique, qui est le produit de  $J_c$  par l'épaisseur  $d$  du film. La plage et la résolution de mesure pour  $J_c d$  des films HTS sont les suivantes:

- $J_c d$ : de 200 A/m à 32 kA/m (sur la base de résultats, aucune limitation);
- Résolution de mesure: 100 A/m (sur la base de résultats, aucune limitation).

#### 2 Référence normative

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.org>>)

---

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