IEC 61788-7

Edition 3.0 2020-03

REDLINE VERSION

colour inside

Superconductivity –
Part 7: Electronic characteristic measurements – Surface resistance of high-temperature superconductors at microwave frequencies

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

ICS 17.220.20; 29.050

ISBN 978-2-8322-8034-8

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.

® Registered trademark of the International Electrotechnical Commission

CONTENTS

FOREWORD 5
INTRODUCTION 7
1 Scope 8
2 Normative references 8
3 Terms and definitions 8
4 Requirements 9
5 Apparatus 9
5.1 Measurement system 9
5.2 Measurement apparatus for R_S 10
5.3 Dielectric rods 12
6 Measurement procedure 13
6.1 Specimen preparation 13
6.2 Set-up 13
6.3 Measurement of reference level 14
6.4 Measurement of the frequency response of resonators 14
6.5 Determination of surface resistance of the superconductor and ε' and tan δ of the standard sapphire rods 16
7 ~~Precision and accuracy~~ Uncertainty of the test method 17
7.1 Surface resistance 17
7.2 Temperature 18
7.3 Specimen and holder support structure 19
7.4 Specimen protection 19
7.5 Uncertainty of surface resistance measured by standard two-resonator method 19
8 Test report 19
8.1 Identification of test specimen 19
8.2 Report of R_S values 19
8.3 Report of test conditions 20
Annex A (informative) Additional information relating to Clauses 1 to 8 21
A.1 Scope 21
A.1.1 General 21
A.1.2 Cylindrical cavity method [10] [17] 21
A.1.3 Parallel-plates resonator method [18] [19] 21
A.1.4 Microstrip-line resonance method [20] [21] 21
A.1.5 Dielectric resonator method [22] [23] [24] [25] 21
A.1.6 Image-type dielectric resonator method [26] [27] 22
A.1.7 Two-resonator method [28] [29] 23
A.2 Requirements 23
A.3 Theory and calculation equations 23
A.4 Apparatus 27
A.5 Dimensions of the standard sapphire rods 27
A.6 Dimension of the closed type resonator 29
~~A.7 Precision and accuracy of the test method ..... 31~~
A.7 Sapphire rod reproducibility 31
A.8 Test results 32

A.9 Reproducibility of measurement method 32
A.10 tan δ deviation effect of sapphire rods on surface resistance 33
Annex B (informative) Evaluation of relative combined standard uncertainty for surface resistance measurement 36
B.1 Practical surface resistance measurement 36
B.2 Determination of surface resistance of the superconductor 37
B.3 Combined standard uncertainty 38
B.3.1 General 38
B.3.2 Calculation of c_2 to c_5 (12 GHz resonance at 20 K) 38
B.3.3 Determination of u_1 to u_5 39
B.3.4 Combined relative standard uncertainty 41
Bibliography 43

Figure 1 – Schematic diagram of measurement system for temperature dependence of R_s using a cryocooler 10
Figure 2 – Typical measurement apparatus for R_s 11
Figure 3 – Insertion attenuation, IA, resonant frequency, f_0, and half power bandwidth, Δf, measured at T kelvin 14
Figure 4 – Reflection scattering parameters (S_{11} and S_{22}) 16
Figure 5 – Term definitions in Table 4 18
Figure A.1 – Schematic configuration of several measurement methods for the surface resistance 22
Figure A.2 – Configuration of a cylindrical dielectric rod resonator short-circuited at both ends by two parallel superconductor films deposited on dielectric substrates 24
Figure A.3 – Computed results of the u-v and W-v relations for TE_{01p} mode 25
Figure A.4 – Configuration of standard dielectric rods for measurement of R_s and tan δ 26
Figure A.5 – Three types of dielectric resonators 27
Figure A.6 – Mode chart to design TE_{011} resonator short-circuited at both ends by parallel superconductor films [28] 28
Figure A.7 – Mode chart to design TE_{013} resonator short-circuited at both ends by parallel superconductor films [28] 29
Figure A.8 – Mode chart for TE_{011} closed-type resonator [28] 30
Figure A.9 – Mode chart for TE_{013} closed-type resonator [28] 31
Figure A.10 – Temperature-dependent R_s of YBCO film with a thickness of 500 nm and size of 25 mm square 32
Figure A.11 – Temperature dependent R_s of YBCO film when R_s was measured three times 33
Figure B.1 – Schematic diagram of TE_{011} and TE_{013} mode resonance 36
Figure B.2 – Typical frequency characteristics of TE_{011} mode resonance 37
Figure B.3 – Frequency characteristics of a resonator approximated by a Lorentz distribution 41

Table 1 – Typical dimensions of pairs of ~~standard~~ single-crystal sapphire rods for 12 GHz, 18 GHz and 22 GHz 12
Table 2 – Dimensions of superconductor film for 12 GHz, 18 GHz, and 22 GHz 13

Table 3 – Specifications for vector network analyzer 17
Table 4 – Specifications for sapphire rods 18
Table A.1 – Standard deviation of the surface resistance calculated from the results of Figure A.11 33
Table A.2 – Relationship between x, defined by Equation (A.12), and y, defined by Equation (A.13) 34

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

_____

SUPERCONDUCTIVITY –

Part 7: Electronic characteristic measurements – Surface resistance of high-temperature 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 attention of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment service 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.

DISCLAIMER
This Redline version is not an official Standard and is intended to provide the user with an indication of what changes have been made to the previous version. Only the IEC International Standard provided in this package is to be considered the official Standard.

This Redline version provides you with a quick and easy way to compare all the changes between this standard and its previous edition. A vertical bar appears in the margin wherever a change has been made. Additions are in green text, deletions are in strikethrough red text.

International Standard IEC 61788-7 has been prepared by IEC technical committee 90: Superconductivity.

This third edition cancels and replaces the second edition, published in 2006. This edition constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition:

a) informative Annex B, relative combined standard uncertainty for surface resistance measurement has been added;
b) precision and accuracy statements have been converted to uncertainty;
c) reproducibility in surface resistant measurement has been added.

The text of this International Standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
90/447/FDIS	90/452/RVD

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

This document 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 document will remain unchanged until the maintenance result date indicated on the IEC web site under "http://webstore.iec.ch" in the data related to the specific publication. At this date, the document 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 some Perovskite-type Cu-containing oxides, extensive research and development (R & D) work on high-temperature ~~oxide~~ superconductors (HTS) has been, and is being, done worldwide, and its application to high-field magnet machines, low-loss power transmission, electronics and many other technologies is in progress.

In various fields of electronics, especially in telecommunication fields, microwave passive devices such as filters using ~~oxide superconductors~~ HTS are being developed and are undergoing on-site testing [1][2][1].

Superconductor materials for microwave resonators [3], filters [4],, antennas [5] and delay lines [6] have the advantage of very low loss characteristics. The parameters of superconductor materials needed for the design of microwave low loss components are the surface resistance, (R_s) and the temperature dependence of the R_s. Knowledge of this parameter is of primary importance for the development of new materials on the supplier side and for the design of superconductor microwave components on the customer side.

~~Recent advances in high Tc superconductor (HTS) thin films with R_s~~ R_s of high quality HTS films is generally several orders of magnitude lower than that of normal metals [7] [8] [9] [10], ~~have~~ which has increased the need for a reliable characterization technique to measure this property ~~[3,4]~~. Traditionally, the R_s of niobium or any other low-temperature superconducting material was measured by first fabricating an entire three-dimensional resonant cavity and then measuring its Q-value [11]. The R_s could be calculated by solving the electro-magnetic field (EM) distribution inside the cavity. Another technique involves placing a small sample inside a larger cavity. This technique has many forms but usually involves the uncertainty introduced by extracting the loss contribution due to the HTS films from the experimentally measured total loss of the cavity.

The best HTS samples are epitaxial films grown on flat crystalline substrates and no high-quality films have been grown on any curved surface so far. What is needed is a technique that: can use these small flat samples; requires no sample preparation; does not damage or change the film; is highly repeatable; has great sensitivity (down to 1/1 000 the R_s of copper); has great dynamic range (up to the R_s of copper); can reach high internal powers with only modest input powers; and has broad temperature coverage (4,2 K to 150 K).

The dielectric resonator method is selected among several methods ~~[5,6,7]~~ to determine the surface resistance at microwave frequencies because it is considered to be the most popular and practical at present. Especially, the sapphire resonator is an excellent tool for measuring the R_s of HTS materials ~~[8,9]~~ [12] [13] [14].

The test method given in this document can also be applied to other superconductor bulk plates including low T_c materials.

This document 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 document 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 7: Electronic characteristic measurements – Surface resistance of high-temperature superconductors at microwave frequencies

1 Scope

This part of IEC 61788 describes measurement of the surface resistance (R_s) of superconductors at microwave frequencies by the standard two-resonator method. The object of measurement is the temperature dependence of R_s at the resonant frequency.

The applicable measurement range of R_s for this method is as follows:

– Frequency: 8 GHz < f < 30 GHz

– Measurement resolution: 0,01 mΩ at 10 GHz

The R_s data at the measured frequency, and that scaled to 10 GHz, assuming the f^2 rule for comparison, is reported.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements 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, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 815: Superconductivity*

IEC 61788-7

Edition 3.0 2020-03

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

colour inside

Superconductivity – Part 7: Electronic characteristic measurements – Surface resistance of high-temperature superconductors at microwave frequencies

Supraconductivité – Partie 7: Mesurages des caractéristiques électronique – Résistance de surface des supraconducteurs haute température critique aux hyperfréquences



IEC 61788-7:2020-03(en-fr)

CONTENTS

FOREWORD 5
INTRODUCTION 7
1 Scope 8
2 Normative references 8
3 Terms and definitions 8
4 Requirements 8
5 Apparatus 9
5.1 Measurement system 9
5.2 Measurement apparatus for R_s 10
5.3 Dielectric rods 12
6 Measurement procedure 12
6.1 Specimen preparation 12
6.2 Set-up 13
6.3 Measurement of reference level 13
6.4 Measurement of the frequency response of resonators 14
6.5 Determination of surface resistance of the superconductor and ε' and tan δ of the standard sapphire rods 16
7 Uncertainty of the test method 17
7.1 Surface resistance 17
7.2 Temperature 18
7.3 Specimen and holder support structure 18
7.4 Specimen protection 19
7.5 Uncertainty of surface resistance measured by standard two-resonator method 19
8 Test report 19
8.1 Identification of test specimen 19
8.2 Report of R_s values 19
8.3 Report of test conditions 19
Annex A (informative) Additional information relating to Clauses 1 to 8 20
A.1 Scope 20
A.1.1 General 20
A.1.2 Cylindrical cavity method [10] [17] 20
A.1.3 Parallel-plates resonator method [18] [19] 20
A.1.4 Microstrip-line resonance method [20] [21] 20
A.1.5 Dielectric resonator method [22] [23] [24] [25] 20
A.1.6 Image-type dielectric resonator method [26] [27] 21
A.1.7 Two-resonator method [28] [29] 22
A.2 Requirements 22
A.3 Theory and calculation equations 22
A.4 Apparatus 25
A.5 Dimensions of the standard sapphire rods 26
A.6 Dimension of the closed type resonator 28
A.7 Sapphire rod reproducibility 30
A.8 Test results 30
A.9 Reproducibility of measurement method 31

A.10 tan δ deviation effect of sapphire rods on surface resistance 32
Annex B (informative) Evaluation of relative combined standard uncertainty for surface resistance measurement 34
B.1 Practical surface resistance measurement 34
B.2 Determination of surface resistance of the superconductor 35
B.3 Combined standard uncertainty 36
B.3.1 General 36
B.3.2 Calculation of c_2 to c_5 (12 GHz resonance at 20 K) 36
B.3.3 Determination of u_1 to u_5 37
B.3.4 Combined relative standard uncertainty 39
Bibliography 41

Figure 1 – Schematic diagram of measurement system for temperature dependence of R_s using a cryocooler 9
Figure 2 – Typical measurement apparatus for R_s 11
Figure 3 – Insertion attenuation, IA, resonant frequency, f_0, and half power bandwidth, Δf, measured at T kelvin 14
Figure 4 – Reflection scattering parameters (S_{11} and S_{22}) 16
Figure 5 – Term definitions in Table 4 18
Figure A.1 – Schematic configuration of several measurement methods for the surface resistance 21
Figure A.2 – Configuration of a cylindrical dielectric rod resonator short-circuited at both ends by two parallel superconductor films deposited on dielectric substrates 23
Figure A.3 – Computed results of the u-v and W-v relations for TE_{01p} mode 24
Figure A.4 – Configuration of standard dielectric rods for measurement of R_s and tan δ 25
Figure A.5 – Three types of dielectric resonators 26
Figure A.6 – Mode chart to design TE_{011} resonator short-circuited at both ends by parallel superconductor films [28] 27
Figure A.7 – Mode chart to design TE_{013} resonator short-circuited at both ends by parallel superconductor films [28] 28
Figure A.8 – Mode chart for TE_{011} closed-type resonator [28] 29
Figure A.9 – Mode chart for TE_{013} closed-type resonator [28] 30
Figure A.10 – Temperature-dependent R_s of YBCO film with a thickness of 500 nm and size of 25 mm square 31
Figure A.11 – Temperature dependent R_s of YBCO film when R_s was measured three times 32
Figure B.1 – Schematic diagram of TE_{011} and TE_{013} mode resonance 34
Figure B.2 – Typical frequency characteristics of TE_{011} mode resonance 35
Figure B.3 – Frequency characteristics of a resonator approximated by a Lorentz distribution 39

Table 1 – Typical dimensions of pairs of single-crystal sapphire rods for 12 GHz, 18 GHz and 22 GHz 12
Table 2 – Dimensions of superconductor film for 12 GHz, 18 GHz, and 22 GHz 13
Table 3 – Specifications for vector network analyzer 17

Table 4 – Specifications for sapphire rods 17
Table A.1 – Standard deviation of the surface resistance calculated from the results of Figure A.11 32
Table A.2 – Relationship between x, defined by Equation (A.12), and y, defined by Equation (A.13) 33

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

_____

SUPERCONDUCTIVITY –

Part 7: Electronic characteristic measurements – Surface resistance of high-temperature 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 attention of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment service 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 61788-7 has been prepared by IEC technical committee 90: Superconductivity.

This third edition cancels and replaces the second edition, published in 2006. This edition constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition:

a) informative Annex B, relative combined standard uncertainty for surface resistance measurement has been added;
b) precision and accuracy statements have been converted to uncertainty;
c) reproducibility in surface resistant measurement has been added.

The text of this International Standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
90/447/FDIS	90/452/RVD

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

This document 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 document will remain unchanged until the maintenance result date indicated on the IEC web site under "http://webstore.iec.ch" in the data related to the specific publication. At this date, the document 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 some Perovskite-type Cu-containing oxides, extensive research and development (R & D) work on high-temperature superconductors (HTS) has been, and is being, done worldwide, and its application to high-field magnet machines, low-loss power transmission, electronics and many other technologies is in progress.

In various fields of electronics, especially in telecommunication fields, microwave passive devices such as filters using HTS are being developed and are undergoing on-site testing [1][1] [2].

Superconductor materials for microwave resonators [3], filters [4], antennas [5] and delay lines [6] have the advantage of very low loss characteristics. The parameters of superconductor materials needed for the design of microwave low loss components are the surface resistance, (R_s) and the temperature dependence of the R_s. Knowledge of this parameter is of primary importance for the development of new materials on the supplier side and for the design of superconductor microwave components on the customer side.

R_s of high quality HTS films is generally several orders of magnitude lower than that of normal metals [7] [8] [9] [10], which has increased the need for a reliable characterization technique to measure this property. Traditionally, the R_s of niobium or any other low-temperature superconducting material was measured by first fabricating an entire three-dimensional resonant cavity and then measuring its Q-value [11]. The R_s could be calculated by solving the electro-magnetic field (EM) distribution inside the cavity. Another technique involves placing a small sample inside a larger cavity. This technique has many forms but usually involves the uncertainty introduced by extracting the loss contribution due to the HTS films from the experimentally measured total loss of the cavity.

The best HTS samples are epitaxial films grown on flat crystalline substrates and no high-quality films have been grown on any curved surface so far. What is needed is a technique that: can use these small flat samples; requires no sample preparation; does not damage or change the film; is highly repeatable; has great sensitivity (down to 1/1 000 the R_s of copper); has great dynamic range (up to the R_s of copper); can reach high internal powers with only modest input powers; and has broad temperature coverage (4,2 K to 150 K).

The dielectric resonator method is selected among several methods to determine the surface resistance at microwave frequencies because it is considered to be the most popular and practical at present. Especially, the sapphire resonator is an excellent tool for measuring the R_s of HTS materials [12] [13] [14]

The test method given in this document can also be applied to other superconductor bulk plates including low T_c materials.

This document 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 document 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 7: Electronic characteristic measurements – Surface resistance of high-temperature superconductors at microwave frequencies

1 Scope

This part of IEC 61788 describes measurement of the surface resistance (R_s) of superconductors at microwave frequencies by the standard two-resonator method. The object of measurement is the temperature dependence of R_s at the resonant frequency.

The applicable measurement range of R_s for this method is as follows:

– Frequency: 8 GHz < f < 30 GHz

– Measurement resolution: 0,01 mΩ at 10 GHz

The R_s data at the measured frequency, and that scaled to 10 GHz, assuming the f^2 rule for comparison, is reported.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements 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, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 815: Superconductivity*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS 47
INTRODUCTION 49
1 Domaine d'application 51
2 Références normatives 51
3 Termes et définitions 51
4 Exigences 51
5 Appareillage 52
5.1 Système de mesure 52
5.2 Appareil de mesure de R_s 53
5.3 Tiges diélectriques 55
6 Procédure de mesure 55
6.1 Préparation de l'éprouvette 55
6.2 Montage 56
6.3 Mesurage du niveau de référence 56
6.4 Mesurage de la réponse en fréquence des résonateurs 57
6.5 Détermination de la résistance de surface du supraconducteur et ε' et tan δ des tiges de saphir normalisées 59
7 Incertitude de la méthode d'essai 60
7.1 Résistance de surface 60
7.2 Température 61
7.3 Structure de l'éprouvette et du support 62
7.4 Protection de l'éprouvette 62
7.5 Incertitude de la résistance de surface mesurée par la méthode normalisée à deux résonateurs 62
8 Rapport d'essai 62
8.1 Identification de l'éprouvette d'essai 62
8.2 Consignation des valeurs R_s 62
8.3 Consignation des conditions d'essai 63
Annexe A (informative) Informations supplémentaires relatives aux Articles 1 à 8 64
A.1 Domaine d'application 64
A.1.1 Généralités 64
A.1.2 Méthode de cavité cylindrique [10] [17] 64
A.1.3 Méthode du résonateur à plaques parallèles [18] [19] 64
A.1.4 Méthode du résonateur microruban [20] [21] 64
A.1.5 Méthode du résonateur diélectrique [22] [23] [24] [25] 64
A.1.6 Méthode du résonateur diélectrique de type image [26] [27] 65
A.1.7 Méthode à deux résonateurs [28] [29] 66
A.2 Exigences 66
A.3 Théorie et équations de calcul 66
A.4 Appareillage 69
A.5 Dimensions des tiges de saphir normalisées 70
A.6 Dimension du résonateur fermé 72
A.7 Reproductibilité de la tige de saphir 74
A.8 Résultats d'essai 74
A.9 Reproductibilité de la méthode de mesure 75

A.10 Effet de l'écart tan δ des tiges de saphir sur la résistance de surface 76
Annexe B (informative) Évaluation de l'incertitude type composée relative pour le mesurage de la résistance de surface 78
B.1 Mesurage pratique de la résistance de surface 78
B.2 Détermination de la résistance de surface du supraconducteur 79
B.3 Incertitude type composée 80
B.3.1 Généralités 80
B.3.2 Calcul de c_2 à c_5 (résonance 12 GHz à 20 K) 80
B.3.3 Détermination de u_1 à u_5 81
B.3.4 Incertitude type composée relative 83
Bibliographie 85

Figure 1 – Schéma du système de mesure de la dépendance de la résistance de surface R_s vis-à-vis de la température à l'aide d'un cryoréfrigérateur 52
Figure 2 – Appareil de mesure classique de R_s 54
Figure 3 – Affaiblissement d'insertion IA, fréquence de résonance f_0 et bande passante à mi-puissance Δf, mesurés à T kelvin 57
Figure 4 – Facteurs de répartition de la réflexion (S_{11} et S_{22}) 59
Figure 5 – Définitions terminologiques du Tableau 4 61
Figure A.1 – Configuration schématique de plusieurs méthodes de mesure pour la résistance de surface 65
Figure A.2 – Configuration d'un résonateur à tige diélectrique cylindrique court-circuité aux deux extrémités par deux films supraconducteurs déposés sur des substrats diélectriques 67
Figure A.3 – Résultats calculés des relations u-v et W-v pour le mode TE_{01p} 68
Figure A.4 – Configuration des tiges diélectriques normalisées pour le mesurage de R_s et tan δ 69
Figure A.5 – Trois types de résonateurs diélectriques 70
Figure A.6 – Graphe de modes de conception du résonateur TE_{011} court-circuité aux deux extrémités par des films supraconducteurs parallèles [28] 71
Figure A.7 – Graphe de modes de conception du résonateur TE_{013} court-circuité aux deux extrémités par des films supraconducteurs parallèles [28] 72
Figure A.8 – Graphe de modes pour le résonateur fermé TE_{011} [28] 73
Figure A 9 – Graphe de modes pour le résonateur fermé TE_{013} [28] 74
Figure A.10 – Valeur R_s dépendante de la température d'un film YBCO de 500 nm d'épaisseur et de 25 mm carrés 75
Figure A.11 – R_s dépendant de la température d'un film YBCO lorsque R_s a été mesuré trois fois 76
Figure B.1 – Diagramme schématique de la résonance de mode TE_{011} et TE_{013} 78
Figure B.2 – Caractéristiques de fréquences classiques de la résonance de mode TE_{011} 79
Figure B.3 – Caractéristiques de fréquence d'un résonateur approchée par une distribution de Lorentz 83

Tableau 1 – Dimensions classiques de paires de tiges de saphir monocristallin pour 12 GHz, 18 GHz et 22 GHz 55

Tableau 2 – Dimensions du film supraconducteur pour 12 GHz, 18 GHz et 22 GHz 56
Tableau 3 – Spécifications pour l'analyseur de réseau vectoriel.....60
Tableau 4 – Spécifications pour les tiges de saphir.....61
Tableau A.1 – Écart-type de la résistance de surface, calculé à partir des résultats de la Figure A.11 76
Tableau A.2 – Relation entre x défini par l'Équation (A.12) et y par l'Équation (A.13) 77

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

_____

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 7: Mesurages des caractéristiques électronique – Résistance de surface des supraconducteurs haute température critique aux hyperfréquences

AVANT-PROPOS

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

Cette troisième édition annule et remplace la deuxième édition parue en 2006. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

a) l'ajout de l'Annexe B informative, incertitude type composée relative pour le mesurage de la résistance de surface;
b) les déclarations de fidélité et d'exactitude ont été converties en incertitude;

c) l'ajout de la reproductibilité du mesurage de résistance de surface.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
90/447/FDIS	90/452/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 internationale.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

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

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

- reconduit,
- supprimé,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendé.

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 certains oxydes de cuivre de type Perovskite, un travail approfondi de recherche et développement (R et D) sur les supraconducteurs haute température (HTS – *high-temperature superconductors*) a été, et est toujours, réalisé dans le monde entier, et son application aux machines à aimant à effet de champ, à la transmission à faible perte de puissance, aux composants électroniques et à d'autres technologies est en cours.

Dans différents domaines de l'électronique, et plus particulièrement dans ceux des télécommunications, les dispositifs hyperfréquences passifs (des filtres utilisant des HTS, par exemple) ont été développés et font actuellement l'objet d'essais sur site [1][1] [2].

Les matériaux supraconducteurs destinés aux résonateurs à hyperfréquences [3], aux filtres [4], aux antennes [5] et aux lignes à retard [6] ont l'avantage de présenter des caractéristiques à très faible perte. Les paramètres des matériaux supraconducteurs nécessaires à la conception des composants hyperfréquences à faible perte sont la résistance de surface (R_s) et la dépendance de R_s vis-à-vis de la température. La connaissance de ce paramètre est d'une importance essentielle pour le développement de nouveaux matériaux côté fournisseur et pour la conception de composants hyperfréquences supraconducteurs côté client.

L'amplitude de la résistance de Surface R_s des films HTS de grande qualité est en général inférieure de plusieurs ordres à celle des métaux normaux [7] [8] [9] [10], ce qui a renforcé la nécessité d'une technique de caractérisation fiable pour mesurer cette propriété. Traditionnellement, la résistance de surface R_s du niobium (Nb) ou de tout autre matériau supraconducteur basse température est mesurée en fabriquant d'abord une cavité (optique) résonante à trois dimensions, puis en mesurant sa valeur Q [11]. La résistance de surface R_s peut être calculée en résolvant la distribution de champ électromagnétique (CEM) à l'intérieur de la cavité. Une autre technique consiste à placer un petit échantillon à l'intérieur d'une cavité plus grande. Cette technique prend de nombreuses formes, mais implique souvent l'incertitude introduite par le retrait de la contribution de la perte due aux films supraconducteurs à haute température de la perte totale mesurée de manière expérimentale de la cavité.

Les meilleurs échantillons HTS sont des films épitaxiaux formés sur des substrats cristallins plats, en effet aucun film de grande qualité n'a été jusqu'ici formé sur une surface arrondie. Il est donc nécessaire de disposer d'une technique qui peut utiliser ces petits échantillons plats, qui n'exige aucune préparation des échantillons, qui n'endommage ni n'altère le film, qui est hautement répétable, qui présente une grande sensibilité (jusqu'à 1/1 000e de la résistance de surface R_s du cuivre), qui présente une large plage dynamique (jusqu'à la résistance de surface R_s du cuivre), qui peut atteindre des puissances internes élevées avec de faibles puissances d'entrée et qui présente une large couverture de températures (4,2 K à 150 K).

La méthode du résonateur diélectrique a été choisie parmi plusieurs méthodes de détermination de la résistance de surface aux hyperfréquences, car elle s'est avérée la plus populaire et la plus pratique actuellement. Plus particulièrement, le résonateur saphir est un excellent outil de mesure de la résistance de surface R_s des matériaux supraconducteurs à haute température [12] [13] [14].

La méthode d'essai spécifiée dans le présent document peut également être appliquée à d'autres éléments supraconducteurs, y compris les matériaux à faible T_c.

Le présent document est destiné à fournir une base technique appropriée et convenable pour le moment aux ingénieurs qui travaillent dans le domaine de l'électronique et des technologies liées à la supraconductivité.

---

1 Les chiffres entre crochets se réfèrent à la bibliographie.

La méthode d'essai couverte par le présent document repose sur le travail de normalisation préalable réalisé dans le cadre du Programme de Versailles sur les matériaux de pointe et les normes (VAMAS – Versailles Project on Advanced Materials and Standards) sur les propriétés des films fins supraconducteurs.

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 7: Mesurages des caractéristiques électronique – Résistance de surface des supraconducteurs haute température critique aux hyperfréquences

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61788 décrit le mesurage de la résistance de surface (R_s) des supraconducteurs aux hyperfréquences par la méthode normalisée à deux résonateurs. L'objet du mesurage est la dépendance de la résistance de surface R_s vis-à-vis de la température à la fréquence de résonance.

La plage de mesures applicable des résistances de surface R_s pour cette méthode est la suivante:

– Fréquence: 8 GHz < f < 30 GHz

– Résolution de mesure: 0,01 mΩ à 10 GHz

Les données de R_s à la fréquence mesurée, et celles mises à l'échelle à 10 GHz, en prenant pour hypothèse la règle de comparaison f^2, doivent être consignées.

2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences 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).

IEC 60050-815, *Vocabulaire Électrotechnique International (IEV) – Partie 815: Supraconductivité*