IEC 61788-26

Edition 1.0 2020-06

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Superconductivity – Part 26: Critical current measurement – DC critical current of RE-Ba-Cu-O composite superconductors

Supraconductivité – Partie 26: Mesurage du courant critique – Courant critique continu des composites supraconducteurs de RE-Ba-Cu-O

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

COMMISSION ELECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

ICS 17.220.20; 19.080; 29.050

ISBN 978-2-8322-8436-0

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.

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

CONTENTS

FOREWORD 4
INTRODUCTION 6
1 Scope 7
2 Normative references 7
3 Terms and definitions 7
4 Principle 8
5 Apparatus 8
5.1 General 8
5.2 Critical current measuring system 8
6 Specimen preparation and setup 8
6.1 Length 8
6.2 Mounting of the specimen 9
7 Critical current measurement 9
8 Calculation of results 9
8.1 Critical current criteria 9
8.2 n-value (optional) 11
9 Uncertainty of measurement 11
10 Test report 11
10.1 Identification of test specimen 11
10.2 Reporting of I_c values 11
10.3 Reporting of I_c test conditions 11
Annex A (informative) Additional information relating to measurement, apparatus, and calculation 12
A.1 General information 12
A.2 Measurement condition 12
A.3 Apparatus 13
A.3.1 Measurement holder material 13
A.3.2 Measurement holder construction 13
A.4 Specimen preparation 14
A.5 Measurement procedure 14
A.5.1 Voltage leads 14
A.5.2 Cooling process 14
A.5.3 Temperature of liquid nitrogen bath 14
A.5.4 System noise and other contributions to the measured voltage 15
A.6 Calculation of n-value 16
Annex B (informative) Evaluation of combined standard uncertainty for REBCO I_c measurement [8] 17
B.1 Practical critical current measurement 17
B.2 Model equation 18
B.3 I_c measurement results 19
B.4 Combined standard uncertainty [11] 21
B.5 Type B uncertainty evaluation 22
B.5.1 General 22
B.5.2 Uncertainty of L_1 measurement 22
B.5.3 Uncertainty of voltage measurement 22

B.5.4 Uncertainty of current measurement 23
B.5.5 Uncertainty of temperature measurement 23
B.5.6 Uncertainty coming from intrinsic non-uniformity of I_c 24
B.5.7 Comparison between types A and B combined standard uncertainties 25
B.6 Influence of current ramp rate on the total uncertainty 26
Bibliography 27

Figure 1 – Schematic view of measurement setup 9
Figure 2 – Intrinsic U-I characteristic 10
Figure 3 – U-I curve with a current transfer component 10
Figure A.1 – Illustration of a measurement configuration for a short specimen of a few hundred amperes class REBCO conductor 13
Figure A.2 – Temperature dependence of I_c for commercial REBCO superconductors (data from [9]) 14
Figure A.3 – Pressure dependence of boiling temperature of liquid nitrogen 15
Figure B.1 – Typical circuit to measure I_c 17
Figure B.2 – Typical voltage–current (U-I) characteristic of a superconductor 18
Figure B.3 – Ramp time dependence of total RSU of I_c for conductors B, C, and D 26

Table A.1 – Thermal contraction data of superconductor and sample-holder materials [1] 13
Table B.1 – Conductors distributed in the international RRT 19
Table B.2 – I_c data for conductor A 19
Table B.3 – I_c data for conductor B 20
Table B.4 – I_c data for conductor C 20
Table B.5 – I_c data for conductor D 20
Table B.6 – Statistics for each conductor 21
Table B.7 – ANOVA results for each conductor 21
Table B.8 – Atmospheric pressure from 1 January 2014 to 31 December 2014 24
Table B.9 – Intrinsic I_c non-uniformity evaluated by RTR-SHPM 24
Table B.10 – Budget table of SUs of I_c measurements for conductor C 25
Table B.11 – Comparison of the relative standard uncertainties for conductors B, C, and D 25

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

_____

SUPERCONDUCTIVITY –

Part 26: Critical current measurement – DC critical current of RE-Ba-Cu-O composite superconductors

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 61788-26 has been prepared by IEC technical committee 90: Superconductivity.

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

FDIS	Report on voting
90/455/FDIS	90/458/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 in the IEC 61788 series, published under the general title *Superconductivity*, can be found on the IEC website.

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

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

INTRODUCTION

In 1986, superconductivity in some perovskite type materials containing copper oxides at temperatures far above the critical temperatures of metallic superconductors was discovered. In 1987, it was discovered that Y-Ba-Cu-O (YBCO) has a critical temperature (T_c) of 93 K. After a quarter century, the RE-Ba-Cu-O (REBCO, RE = rare earth) superconductors became commercially available.

In 2013, VAMAS-TWA 16 started working on the critical current measurement methods in REBCO superconductors. In 2014, an international round robin test (RRT) on the critical current measurement method for REBCO superconductors was conducted that was led by VAMAS-TWA 16. 10 institutions/universities/industries from five countries participated. The pre-standardization work of VAMAS was taken as a base for this document, on the DC critical current test method of REBCO composite superconductors.

The test method covered in this document is intended to give an appropriate and accepted technical base to engineers working in the field of superconductivity technology.

SUPERCONDUCTIVITY –

Part 26: Critical current measurement – DC critical current of RE-Ba-Cu-O composite superconductors

1 Scope

This part of IEC 61788 specifies a test method for determining the DC critical current of short RE (rare earth)-Ba-Cu-O (REBCO) composite superconductor specimens that have a shape of straight flat tape. This document applies to test specimens shorter than 300 mm and having a rectangular cross section with an area of 0,03 mm^2 to 7,2 mm^2, which corresponds to tapes with width ranging from 1,0 mm to 12,0 mm and thickness from 0,03 mm to 0,6 mm.

This method is intended for use with superconductor specimens that have critical current less than 300 A and n-values larger than 5 under standard test conditions: the test specimen is immersed in liquid nitrogen bath at ambient pressure without external magnetic field during the testing. Deviations from this test method that are allowed for routine tests and other specific restrictions are given in this document.

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 30
INTRODUCTION 32
1 Domaine d'application 33
2 Références normatives 33
3 Termes et définitions 33
4 Principe 34
5 Appareillage 34
5.1 Généralités 34
5.2 Système de mesure du courant critique 34
6 Préparation et montage de l'échantillon 34
6.1 Longueur 34
6.2 Montage de l'échantillon 35
7 Mesurage du courant critique 35
8 Calcul des résultats 36
8.1 Critères de courant critique 36
8.2 Valeur n (calcul facultatif) 37
9 Incertitude de mesure 37
10 Rapport d'essai 37
10.1 Identification de l'échantillon d'essai 37
10.2 Rapport des valeurs I_c 37
10.3 Rapport des conditions d'essai I_c 38
Annexe A (informative) Informations complémentaires relatives au mesurage, à l'appareillage et au calcul 39
A.1 Informations générales 39
A.2 Conditions de mesure 39
A.3 Appareillage 40
A.3.1 Matériau du support de mesure 40
A.3.2 Construction du support de mesure 40
A.4 Préparation de l'échantillon 41
A.5 Procédure de mesure 41
A.5.1 Fils de tension 41
A.5.2 Processus de refroidissement 41
A.5.3 Température du bain d'azote liquide 41
A.5.4 Bruit du système et autres contributions à la tension mesurée 43
A.6 Calcul de la valeur n 43
Annexe B (informative) Évaluation de l'incertitude type composée pour le mesurage de I_c des supraconducteurs REBCO [8] 44
B.1 Mesurage pratique du courant critique 44
B.2 Équation modèle 45
B.3 Résultats de mesure de I_c 46
B.4 Incertitude type composée [11] 48
B.5 Évaluation d'incertitude de type B 49
B.5.1 Généralités 49
B.5.2 Incertitude de mesure de L_1 49
B.5.3 Incertitude de mesure de la tension 49

B.5.4 Incertitude de mesure du courant 50
B.5.5 Incertitude de mesure de la température 50
B.5.6 Incertitude due à la non-uniformité intrinsèque de I_c 51
B.5.7 Comparaison entre les incertitudes types composées de type A et de type B 52
B.6 Influence du temps de variation du courant sur l'incertitude globale 53
Bibliographie 54

Figure 1 – Vue schématique d'un montage de mesure 35
Figure 2 – Caractéristique U-I intrinsèque 36
Figure 3 – Courbe U-I avec une composante de transfert de courant 37
Figure A.1 – Illustration d'une configuration de mesure pour un petit échantillon de quelques centaines de conducteurs REBCO de classe A 41
Figure A.2 – Dépendance du courant I_c des supraconducteurs REBCO commerciaux vis-à-vis de la température (données issues de [9]) 42
Figure A.3 – Dépendance de la température d'ébullition de l'azote liquide vis-à-vis de la pression 42
Figure B.1 – Circuit type de mesure de I_c. 44
Figure B.2 – Caractéristique tension–courant (U-I) type d'un supraconducteur 45
Figure B.3 – Dépendance de la RSU globale de I_c vis-à-vis du temps de variation pour les conducteurs B, C et D 53

Tableau A.1 – Données de contraction thermique de matériaux supraconducteurs et de support d'échantillon [1] 40
Tableau B.1 – Conducteurs distribués dans le cadre de l'essai international de comparaison interlaboratoires 46
Tableau B.2 – Données I_c pour le conducteur A 46
Tableau B.3 – Données I_c pour le conducteur B 47
Tableau B.4 – I_c data for conductor C 47
Tableau B.5 – I_c data for conductor D 47
Tableau B.6 – Statistiques pour chaque conducteur 48
Tableau B.7 – Résultats de l'ANOVA pour chaque conducteur 48
Tableau B.8 – Pression atmosphérique du 1er janvier 2014 au 31 décembre 2014 51
Tableau B.9 – Non-uniformité intrinsèque de I_c évaluée par microscopie RTR-SHPM 52
Tableau B.10– Tableau budgétaire des incertitudes types de mesure de I_c pour le conducteur C 52
Tableau B.11 – Comparaison des incertitudes types relatives pour les conducteurs B, C et D 53

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

_____

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 26: Mesurage du courant critique – Courant critique continu des composites supraconducteurs de RE-Ba-Cu-O

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 des services 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 61788-26 a été établie par le comité d'études 90 de l'IEC: Supraconductivité.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
90/455/FDIS	90/458/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de la présente norme.

Cette publication a été rédigée 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 cette publication 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, la publication sera

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

INTRODUCTION

En 1986, la supraconductivité a été découverte dans des matériaux de type pérovskite contenant des oxydes de cuivre à des températures très supérieures aux températures critiques des supraconducteurs métalliques. En 1987, il a été découvert que la température critique (T_c) de Y-Ba-Cu-O (YBCO) est de 93 K. Après un quart de siècle, les supraconducteurs RE-Ba-Cu-O (REBCO, RE = terre rare) sont disponibles dans le commerce.

En 2013, le VAMAS-TWA (Technical Working Areas) 16 a commencé à travailler sur les méthodes de mesure du courant critique des supraconducteurs REBCO. En 2014, TWA 16 a conduit un essai international de comparaison interlaboratoires sur la méthode de mesure du courant critique des supraconducteurs REBCO. Dix institutions/universités/industries de cinq pays y ont participé. Les travaux de prénormalisation menés par VAMAS ont servi de base au présent document sur la méthode d'essai du courant critique continu des composites supraconducteurs REBCO.

La méthode d'essai traitée dans le présent document est destinée à fournir une base technique appropriée et acceptée aux ingénieurs évoluant dans le domaine de la technologie de la supraconductivité.

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 26: Mesurage du courant critique – Courant critique continu des composites supraconducteurs de RE-Ba-Cu-O

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61788 spécifie une méthode d'essai pour la détermination du courant critique continu des échantillons de composites supraconducteurs RE (terre rare)-Ba-Cu-O (REBCO) courts en forme de ruban plat et rectiligne. Le présent document s'applique aux échantillons d'essai d'une longueur inférieure à 300 mm et d'une superficie de section rectangulaire de 0,03 mm^2 à 7,2 mm^2, ce qui correspond aux rubans d'une largeur de 1,0 mm à 12,0 mm et d'une épaisseur de 0,03 mm à 0,6 mm.

Cette méthode est destinée à être utilisée avec des échantillons de supraconducteurs caractérisés par un courant critique inférieur à 300 A et des valeurs n supérieures à 5 dans les conditions d'essai normalisées: l'échantillon d'essai est immergé dans un bain d'azote liquide à pression ambiante sans champ magnétique externe pendant l'essai. Le présent document spécifie les écarts par rapport à cette méthode d'essai qui sont admis dans les essais individuels de série, ainsi que d'autres restrictions spécifiques.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils 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 Electrotechnique International (IEV) – Partie 815: Supraconductivité*