IEC 61788-22-3

Edition 1.0 2022-08

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

colour inside

Superconductivity –
Part 22-3: Superconducting strip photon detector – Dark count rate

Supraconductivité –
Partie 22-3: Détecteur de photons à bande supraconductrice – Taux de comptage en obscurité

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.050

ISBN 978-2-8322-4070-0

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 8
2 Normative references 8
3 Terms, definitions and abbreviated terms 8
3.1 Terms and definitions 8
3.2 Abbreviated terms 10
4 Principle of the measurement method 10
5 Apparatus 11
5.1 Detector packaging 11
5.2 Cryogenic system 11
5.3 Measurement system 13
6 Measurement procedure 14
6.1 Measurement of temperature 14
6.2 Measurement of switching current 14
6.3 Measurement of R_D 15
7 Standard uncertainty 16
7.1 Type A uncertainty 16
7.2 Type B uncertainty 16
7.3 Uncertainty budget table 17
7.4 Uncertainty requirement 18
8 Test report 18
8.1 Identification of device under test (DUT) 18
8.2 Measurement conditions and results 18
8.3 Miscellaneous optional report 19
Annex A (informative) Results of the round robin test 20
A.1 DUT packages 20
A.2 Measurement conditions 20
A.3 Measurement results 21
Bibliography 25

Figure 1 – Example of one dark count pulse in the pulse train in inset 9
Figure 2 – Schematic curve of R_D as a function of normalized bias current 11
Figure 3 – Schematic diagram of a typical DCR measurement system 12
Figure 4 – Equivalent circuit of the DCR measurement 13
Figure 5 – Typical current-voltage (I-U) curve of an SSPD 15
Figure A.1 – Photograph of the DUT with an SSPD and a temperature sensor 20
Figure A.2 – I-U curve and R_D curves 22

Table 1 – Uncertainty budget table for R_D 18
Table A.1 – Test data of DUT 22
Table A.2 – Temperature sensitivity and bias current sensitivity above a normalized bias current of 0,9 23

Table A.3 – u_A and u_B above a normalized bias current of 0,9 23
Table A.4 – Budget table for R_D at a bias point of 5,25 µA (I_b/I_{sw} = 0,955) 23
Table A.5 – DCR values measured at a bias point of 5,25 µA (I_b/I_{sw} = 0,955) 24
Table A.6 – Temperature measurement 24

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

_____

SUPERCONDUCTIVITY –

Part 22-3: Superconducting strip photon detector – Dark count rate

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.

IEC 61788-22-3 has been prepared by IEC technical committee 90: Superconductivity. It is an International Standard.

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

Draft	Report on voting
90/489/FDIS	90/491/RVD

Full information on the voting for its approval can be found in the report on voting indicated in the above table.

The language used for the development of this International Standard is English.

This document was drafted in accordance with ISO/IEC Directives, Part 2, and developed in accordance with ISO/IEC Directives, Part 1 and ISO/IEC Directives, IEC Supplement, available at www.iec.ch/members_experts/refdocs. The main document types developed by IEC are described in greater detail at www.iec.ch/standardsdev/publications.

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 document will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under webstore.iec.ch in the data related to the specific document. 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 document 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

IEC 61788-22 (all parts) is a series of International Standards on superconductor electronic devices. Superconductivity enables ultra-sensitive sensing or detection of a variety of measurands. IEC 61788-22-1 [1][1] lists various types of superconductor sensors and detectors. The strip type in this document is one of them.

A typical fundamental structure of strip type detectors is a meander superconductor line, for example, with a thickness of less than 10 nm, a width of less than 100 nm or a few 100 nm, and a length of a few mm. The structure is in the nanoscale. ISO TS 80004-2:2015 [2] defines the nanoscale as a length range approximately from 1 nm to 100 nm. Because nano-objects have one or two dimensions in the nanoscale, superconductor meander lines are categorized as a nano-object.

The term "nanowire" is frequently used for superconductor meander lines, but it is not recommended in this document. In the ISO vocabulary, a nanowire is defined as an electrically conducting or semi-conducting nanofibre with two external dimensions in the nanoscale, with the third dimension being significantly larger. The two external dimensions of the nanowires are in the nanoscale range, approximately from 1 nm to 100 nm. When the first two dimensions differ significantly, a "nanoplate," "nanoribbon," or "nanotape" shall be used for the meander line shape. However, in the field of electronics, these terms are not common. In addition to the ISO definition of nano-objects, the shape of the superconductor meander lines may not fit the shape of common wires that have a round cross-section. Although there are cases in which a superconductor line shape falls into the category of nanowire (e.g. a superconductor line with a thickness of 10 nm and a width of 100 nm), the theoretical treatment of single photon detection mechanisms still requires "strip" rather than "nanowire": the width is wider than coherence length and thus the superconductor line has a two-dimensional nature. Therefore, IEC 61788-22-1 assigns the word "strip" or "nanostrip" to the meander line shape. According to the nomenclature of the standard, the strip type detector is called superconductor strip photon detector (SSPD) or superconductor nanostrip photon detector (SNSPD). The abbreviated term SSPD is used in this document.

SSPDs are usually cooled down to a temperature well below the critical temperature and current-biased with a bias value close to, but smaller than, its switch current. The photon detection mechanisms can be described by Cooper-pair breaking, leading to hotspot formation or vortex motion, followed by electrothermal feedback creating a resistive region [3], [4]. Although an exact detection model has not been established yet, it is true that photon absorption leads to Cooper pair breaking that creates quasiparticles because the photon energy in a telecommunication wavelength band (~ 1 eV) is typically 2 to 3 orders of magnitude higher than the binding energy of a Cooper pair (~ meV). The photon absorption may create a normal-conducting local-hotspot in the nanostrip. With an electrothermal feedback process, the normal conducting domain expands across the width of the nanostrip and along the current flow direction, leading to a voltage drop in the superconductor nanostrip. Other possible models are vortex-antivortex depairing, in which two vortices move toward the opposite strip edges, and single vortex crossing. Such vortex motion also creates a voltage drop, which can be followed by resistive domain creation with the same electrothermal feedback mechanism. Because of the resistive domain in the strip, the bias current is diverted to a readout circuit. The normal conducting region will be cooled down rapidly and finally disappear. The above process produces a voltage pulse which corresponds to an event of single photon absorption.

Typical application areas of SSPDs include quantum information, laser communication, light detection and ranging, fluorescence spectroscopy and quantum computing. The SSPDs outperform such single photon detectors as photomultipliers and avalanche photodiodes in performance measures listed in the next paragraph. Due to the increasing needs for ultra-sensitive photon detection in a range of visible to mid-infrared wavelengths, the SSPD market

[1] Figures in square brackets refer to the Bibliography.

is growing quickly. The standardization of SSPDs is beneficial to not only the industrial application, but also detector development.

For photon detection, there are fundamental parameters, such as detection efficiency, timing jitter, dead time and dark count rate. The dark count rate affects the measurement of other parameters. For this reason, priority is given to the dark count rate. This document (IEC 61788-22-3) defines a measurement method of dark count rate (DCR).

SUPERCONDUCTIVITY –

Part 22-3: Superconducting strip photon detector – Dark count rate

1 Scope

This part of IEC 61788 is applicable to the measurement of the dark count rate (DCR, R_D) of superconductor strip photon detectors (SSPDs). It specifies terms, definitions, symbols and the measurement method of DCR that depends on the bias current (I_b) and operating temperature (T).

NOTE The data of measurement results in Annex A are based on measurements of one institute only. The standard will be updated after the data of a complete round robin test are available.

2 Normative references

There are no normative references in this document.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS 28
INTRODUCTION 30
1 Domaine d'application 32
2 Références normatives 32
3 Termes, définitions et termes abrégés 32
3.1 Termes et définitions 32
3.2 Termes abrégés 34
4 Principe de la méthode de mesurage 34
5 Appareillage 35
5.1 Encapsulation du détecteur 35
5.2 Système cryogénique 35
5.3 Système de mesurage 37
6 Procédure de mesurage 38
6.1 Mesurage de la température 38
6.2 Mesurage du courant de commutation 38
6.3 Mesurage de R_D 39
7 Incertitude type 40
7.1 Incertitude de type A 40
7.2 Incertitude de type B 40
7.3 Tableau du bilan d'incertitude 41
7.4 Exigence d'incertitude 42
8 Rapport d'essai 42
8.1 Identification du dispositif en essai (DUT) 42
8.2 Conditions de mesurage et résultats mesurés 42
8.3 Rapport facultatif − Divers 43
Annexe A (informative) Résultats de l'essai interlaboratoire 44
A.1 Boîtiers des DUT 44
A.2 Conditions de mesurage 44
A.3 Résultats de mesurage 45
Bibliographie 49

Figure 1 – Exemple d'impulsion de comptage en obscurité dans le train d'impulsions représenté dans l'encadré 33
Figure 2 – Courbe schématique de R_D en fonction du courant de polarisation normalisé 35
Figure 3 – Schéma d'un système de mesurage DCR type 36
Figure 4 – Circuit équivalent pour le mesurage de DCR 37
Figure 5 – Courbe courant-tension (I-U) type d'un SSPD 39
Figure A.1 – Photographie du DUT équipé d'un SSPD et d'un capteur de température 44
Figure A.2 – Courbe I-U et courbes R_D 46

Tableau 1 – Tableau du bilan d'incertitude pour R_D 42
Tableau A.1 – Données d'essai du DUT 46

Tableau A.2 – Sensibilité à la température et sensibilité au courant de polarisation au-dessus d'un courant de polarisation normalisé de 0,9 47
Tableau A.3 – u_A et u_B au-dessus d'un courant de polarisation normalisé de 0,9 47
Tableau A.4 – Tableau du bilan pour R_D à un point de polarisation de 5,25 µA (I_b/I_{sw} = 0,955) 47
Tableau A.5 – Valeurs DCR mesurées à un point de polarisation de 5,25 µA (I_b/I_{sw} = 0,955) 48
Tableau A.6 – Températures mesurées 48

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

_____

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 22-3: Détecteur de photons à bande supraconductrice – Taux de comptage en obscurité

AVANT-PROPOS

1) La Commission Electrotechnique 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. A 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.

L'IEC 61788-22-3 a été établie par le comité d'études 90 de l'IEC: Supraconductivité. Il s'agit d'une Norme internationale.

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

Projet	Rapport de vote
90/489/FDIS	90/491/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à son approbation.

La langue employée pour l'élaboration de cette Norme internationale est l'anglais.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2, il a été développé selon les Directives ISO/IEC, Partie 1 et les Directives ISO/IEC, Supplément IEC, disponibles sous www.iec.ch/members_experts/refdocs. Les principaux types de documents développés par l'IEC sont décrits plus en détail sous www.iec.ch/standardsdev/publications.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 61788, publiées sous le titre général Supraconductivité, se trouve 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 webstore.iec.ch dans les données relatives au document recherché. A cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé 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

L'IEC 61788-22 (toutes les parties) est une série de Normes internationales relatives aux dispositifs électroniques supraconducteurs. La supraconductivité permet de capter et détecter une vaste gamme de mesurandes avec une très grande sensibilité. L'IEC 61788-22-1 [1][1] répertorie les différents types de capteurs et détecteurs supraconducteurs disponibles. Le type à bande dont traite le présent document est l'un d'entre eux.

La ligne en serpentin supraconductrice est une structure fondamentale couramment employée dans les détecteurs à bande, avec par exemple une épaisseur inférieure à 10 nm, une largeur inférieure à 100 nm ou de quelques centaines de nm, ainsi qu'une longueur de quelques mm. La structure est à l'échelle nanométrique. L'ISO TS 80004-2:2015 [2] définit l'échelle nanométrique comme une échelle de longueur qui s'étend approximativement de 1 nm à 100 nm. Comme les nano-objets ont une ou deux dimensions à l'échelle nanométrique, les lignes en serpentin supraconductrices sont classées dans la catégorie des nano-objets.

Le terme "nanofil" est fréquemment utilisé pour les lignes en serpentin supraconductrices, mais il n'est pas recommandé dans le présent document. Dans le vocabulaire de l'ISO, un nanofil est défini comme une nanofibre électriquement conductrice ou semi-conductrice dont deux dimensions externes sont à l'échelle nanométrique, et dont la troisième dimension est significativement plus élevée. Les deux dimensions extérieures des nanofils sont de l'ordre du nanomètre, soit environ de 1 nm à 100 nm. Lorsque les deux premières dimensions diffèrent de manière significative, le terme "nanoplaque" ou "nanoruban" doit être utilisé pour désigner la forme des lignes en serpentin. Toutefois, dans le domaine de l'électronique, ces termes ne sont pas courants. En plus de la définition ISO des nano-objets, la forme des lignes en serpentin supraconductrices peut ne pas correspondre à la forme des fils couramment utilisés de section circulaire. Même s'il existe des cas où une forme de ligne supraconductrice entre dans la catégorie des nanofils (par exemple une ligne supraconductrice d'une épaisseur de 10 nm et d'une largeur de 100 nm), le traitement théorique des mécanismes de détection d'un photon exige néanmoins une "bande" et non pas un "nanofil": étant donné que la largeur est supérieure à la longueur de cohérence, la ligne supraconductrice a une structure bidimensionnelle. C'est pourquoi l'IEC 61788-22-1 associe le terme "bande" ou "nanobande" à la forme des lignes en serpentin. D'après la nomenclature de la norme, le détecteur à bande est appelé détecteur de photons à bande supraconductrice (SSPD, *Superconductor Strip Photon Detector*) ou détecteur de photons à nanobande supraconductrice (SNSPD, *Superconductor Nanostrip Photon Detector*). L'abréviation SSPD est utilisée dans le présent document.

Les SSPD sont généralement refroidis à une température bien inférieure à la température critique et polarisés par un courant dont la valeur de polarisation est proche de l'intensité de son courant de commutation, mais inférieure à cette intensité. Les mécanismes de détection de photons peuvent être décrits par la rupture des paires de Cooper qui entraîne la formation de points chauds ou d'un mouvement des vortex, suivie d'un mécanisme de retour électrothermique, ce qui donne lieu à la formation d'une région résistive [3][4]. Même si un modèle de détection exact n'a pas encore été établi, il est vrai que l'absorption de photons entraîne la rupture des paires de Cooper, ce qui forme des quasi-particules, car l'énergie photonique présente dans une bande de longueurs d'onde de télécommunication (~ 1 eV) est généralement de 2 à 3 ordres de grandeur supérieure à l'énergie de liaison d'une paire de Cooper (~ meV). L'absorption de photons peut entraîner la formation d'un point chaud local conducteur normal dans la nanobande. Avec un processus de retour électrothermique, le domaine conducteur normal s'étend sur toute la largeur de la nanobande et dans le sens d'écoulement du courant, ce qui entraîne une chute de tension de la nanobande supraconductrice. La séparation de la paire vortex-antivortex, pendant laquelle deux vortex se déplacent vers les bords opposés de la bande, ainsi que le croisement de vortex isolés constituent d'autres modèles possibles Un tel mouvement des vortex entraîne également une chute de tension, qui peut être suivie par la formation d'un domaine résistif avec le même mécanisme de retour électrothermique.

---

1 Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie.

En raison du domaine résistif de la bande, le courant de polarisation est renvoyé vers un circuit de lecture. La région conductrice normale refroidit rapidement et finit par disparaître. Le processus ci-dessus engendre une impulsion de tension qui correspond à une absorption d'un photon isolé.

Les domaines d'application types des SSPD comprennent l'information quantique, la communication à laser, la télédétection par laser, la spectroscopie en fluorescence et l'informatique quantique. Les SSPD sont plus performants que les détecteurs de photons isolés, tels que les photomultiplicateurs et les photodiodes à avalanche dans les mesures de performance énumérées dans l'alinéa suivant. En raison des besoins croissants dans le domaine de la détection de photons à très grande sensibilité dans la plage de longueurs d'onde allant du domaine visible à celui de l'infrarouge moyen, le marché des SSPD se développe rapidement. La normalisation des SSPD est un atout non seulement pour les applications industrielles, mais également pour le développement des détecteurs.

Pour la détection de photons, les paramètres fondamentaux sont le rendement de détection, la gigue de synchronisation, le temps mort et le taux de comptage en obscurité. Le taux de comptage en obscurité a une incidence sur le mesurage des autres paramètres. C'est pourquoi le taux de comptage en obscurité est le paramètre mesuré en priorité. Le présent document (IEC 61788-22-3) définit une méthode de mesurage pour le taux de comptage en obscurité (DCR).

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 22-3: Détecteur de photons à bande supraconductrice – Taux de comptage en obscurité

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61788 s'applique au mesurage du taux de comptage en obscurité (DCR, R_D) des détecteurs de photons à bande supraconductrice (SSPD). Elle spécifie les termes, les définitions, les symboles, ainsi que la méthode de mesurage du DCR qui dépend du courant de polarisation (I_b) et de la température de fonctionnement (T).

NOTE Les données des résultats de mesure figurant à l'Annexe A sont fondées sur les mesures d'un seul établissement. La norme sera mise à jour lorsque les données d'un essai interlaboratoire complet seront disponibles.

2 Références normatives

Le présent document ne contient aucune référence normative.