

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Superconductivity –
Part 22-1: Superconducting electronic devices – Generic specification for
sensors and detectors**

**Supraconductivité –
Partie 22-1: Dispositifs électroniques supraconducteurs – Spécification
générique pour les capteurs et détecteurs**

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-22-1:2017



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2017 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigendum or an amendment might have been published.

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and once a month by email.

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: sales@iec.ch.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 000 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

67 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications IEC

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et une fois par mois par email.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: sales@iec.ch.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 000 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

67 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Superconductivity –

Part 22-1: Superconducting electronic devices – Generic specification for sensors and detectors

Supraconductivité –

Partie 22-1: Dispositifs électroniques supraconducteurs – Spécification générique pour les capteurs et détecteurs

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 17.220; 29.050

ISBN 978-2-8322-7308-1

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

CONTENTS

CONTENTS	2
FOREWORD	4
INTRODUCTION	6
1 Scope	7
2 Normative references	7
3 Terms and definitions	7
4 Symbols	10
5 Terminology and classification	11
5.1 Terminology	11
5.2 Classification	14
6 Cryogenic operation condition	15
7 Marking	15
7.1 Device identification	15
7.2 Packing	15
8 Test and measurement procedures	15
Annex A (informative) Coherent detection	16
A.1 Superconducting hot electron bolometric (SHEB) type	16
A.2 Superconducting tunnel junction (STJ) type	17
A.3 Superconducting quantum interference device (SQUID) type	18
Annex B (informative) Direct detection	20
B.1 Metallic magnetic calorimetric (MMC) type	20
B.2 Microwave kinetic inductance (MKI) type	21
B.3 Superconducting strip (SS) type	22
B.4 Superconducting tunnel junction (STJ) type	22
B.5 Transition edge sensor (TES) type	23
Annex C (normative) Graphical symbols for use on equipment and diagrams	25
C.1 Superconducting region, one superconducting connection	25
C.2 Superconducting region, one normal-conducting connection	25
C.3 Normal-superconducting boundary	25
C.4 A variation	26
C.5 Josephson junction	26
Bibliography	27
Figure A.1 – SHEB mixer	17
Figure A.2 – STJ mixer	18
Figure A.3 – DC SQUID	19
Figure B.1 – MMC detector	20
Figure B.2 – MKI detector	21
Figure B.3 – SS detector	22
Figure B.4 – STJ detector	23
Figure B.5 – TES detector	24
Figure C.1 – Superconducting region, one superconducting connection	25
Figure C.2 – Superconducting region, one normal-conducting connection	25

Figure C.3 – Superconducting region, one superconducting connection, and one normal-conducting connection (normal-superconducting boundary, IEC 60417-6370:2016-09)	25
Figure C.4 – Series connection	26
Figure C.5 – Superconducting region, two superconducting connections with extremely small non-superconducting region (Josephson junction, IEC 60417-6371:2016-09).....	26
Table 1 – Measurands	12
Table 2 – Classification of measurands.....	12
Table 3 – Nomenclature of superconducting sensors and detectors: type, full names, and acronym examples	13
Table 4 – Classification of detection principles.....	14

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-22-1:2017

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SUPERCONDUCTIVITY –**Part 22-1: Superconducting electronic devices –
Generic specification for sensors and detectors****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 61788-22-1 has been prepared by IEC technical committee 90: Superconductivity.

This bilingual version (2019-08) corresponds to the monolingual English version, published in 2017-07.

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

FDIS	Report on voting
90/388/FDIS	90/391/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.

The French version of this standard has not been voted upon.

This document 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 document will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under "<http://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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-22-1:2017

INTRODUCTION

Superconductivity offers various possibilities for the realization of sensing and detection of a variety of measurands. Several sensors and detectors have been developed, exploiting features like superconducting energy gaps, sharp normal-superconducting transition, nonlinear I – V characteristics, superconducting coherent states, and quantization of magnetic flux. All these properties can be influenced by the interaction with electromagnetic fields, photons, ions, etc. Superconducting sensors and detectors have extremely high performance for energy resolution, time response, and low noise, most of which cannot be realized by any other phenomena.

The word "sensor" is normally used for measuring stationary or slowly changing electromagnetic fields, physical quantities such as current and temperature. On the other hand, the word "detector" is normally used for single quanta such as photons from infrared to γ -rays and individual particles. However, the boundary between "sensor" and "detector" is ambiguous. In this document, therefore, both "sensor" and "detector" are used. Additionally, a detector using a sensor is possible, for example, X-ray detector using transition edge sensor (TES) that measures temperature rise due to the deposition of measurand energy. In this document, for example, the terminology "transition edge sensor X-ray detector" is used for X-ray detection using TES.

Superconducting sensors and detectors have been applied to a variety of fields including medical diagnosis, telecommunications, mineral exploration, astronomical instruments, quantum information processing, and analytical instruments. For users, IEC standardization is necessary because there is confusing terminology, there are no graphical symbols for diagrams, and no test methods.

SUPERCONDUCTIVITY –

Part 22-1: Superconducting electronic devices – Generic specification for sensors and detectors

1 Scope

This part of IEC 61788-22-1 describes general items concerning the specifications for superconducting sensors and detectors, which are the basis for specifications given in other parts of IEC 61788 for various types of sensors and detectors. The sensors and detectors described are basically made of superconducting materials and depend on superconducting phenomena or related phenomena. The objects to be measured (measurands) include magnetic fields, electromagnetic waves, photons of various energies, electrons, ions, α -particles, and others.

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 60027 (all parts), *Letter symbols to be used in electrical technology*

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

IEC 60417, *Graphical symbols for use on equipment* (available at: <http://www.graphical-symbols.info>)

IEC 60617, *Graphical symbols for diagrams* (available at: <http://std.iec.ch/iec60617>)

ISO 1000, *SI units and recommendations for the use of their multiples and of certain other units*

ISO 7000, *Graphical symbols for use on equipment – Registered symbols* (available at: <http://www.graphical-symbols.info>)

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60050-815 and the following apply.

ISO and IEC maintain terminological databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <http://www.iso.org/obp>

3.1

additional positive feedback

APF

method enhancing voltage-flux transformation ratio by using resistance and coupling coil to SQUID ring

3.2

critical current modulation parameter

β_L

parameter defined by $2LI_c/\Phi_0$, where L is the SQUID washer inductance, I_c is the critical current of a Josephson junction, for DC SQUIDs, and a parameter defined by $2\pi LI_c/\Phi_0$ for RF SQUIDs

Note 1 to entry: The term "shielding parameter" can also be used.

3.3

Stewart-McCumber parameter

β_C

parameter defined by $2\pi I_c R_n^2 C / \Phi_0$, where R_n is the normal state resistance of a Josephson junction, and C is the capacitance of a Josephson junction

3.4

bridge junction

junction formed from two superconductors connected by a superconducting bridge of small section

Note 1 to entry: The term "microbridge" can also be used.

3.5

critical current

I_c

maximum direct current that can be regarded as flowing through a Josephson junction without resistance

3.6

critical current density

J_c

critical current divided by the cross-section of the conductor or the junction area of the Josephson junction

3.7

feedback coil

coil that is inductively coupled to a SQUID operated in the flux locked loop (FLL) mode

3.8

flux locked loop

FLL

method that improves linearity and dynamic range of a SQUID by using negative feedback to keep the constant flux number in the SQUID ring

3.9

gradiometer

configuration of superconducting loops coupled to a SQUID magnetometer, or of multiple SQUID magnetometers that are arranged so as to be insensitive to homogenous magnetic fields or to be sensitive to magnetic field gradients

3.10**metallic magnetic calorimetric detector**

type of superconducting device that the temperature increase of a metallic absorber is measured by sensing the magnetization change of the absorber because of measurand energy deposition

3.11**microwave kinetic inductance detector**

type of superconducting device that uses the microwave surface impedance change of a superconducting strip because of measurand energy deposition

3.12**normal state resistance**

resistance of a superconductor or a Josephson junction at a normal state

Note 1 to entry: In a superconductor or a TES, it is the resistance at a temperature just above the superconducting transition.

Note 2 to entry: In a Josephson junction, it is the tunnelling resistance at a bias voltage well above $2\Delta/e$.

3.13**planar gradiometer**

kind of configuration of the flux pickup loop that measures a magnetic field gradient in the plane of the flux pickup loop coupled to a SQUID

3.14**quasiparticle**

excitation combining properties of an electron and a hole that is created by breaking a Cooper pair in a superconductor

3.15**superconducting hot electron bolometric mixer**

type of superconducting device that uses heterodyne mixing with the resistive transition from the superconducting state to the normal state in a superconducting microbridge because of measurand energy deposition

3.16**superconducting quantum interference device sensor**
SQUID sensor

type of superconducting device that uses quantum interference occurring in a closed electrical circuit containing one or more Josephson junctions

Note 1 to entry: Every measurand, for example magnetic fields or electric currents, that is transformed into a change of magnetic flux threading the superconducting structure can be sensed by a SQUID.

3.17**SQUID array****SQA**

device consisting of series and/or parallel arrays of multiple SQUIDs

3.18**nano-SQUID**

device whose largest loop dimension is less than 500 nm

3.19**SQUID ring**

multiply superconducting structure that contains one or more Josephson junctions

Note 1 to entry: The term "SQUID loop" can also be used.

3.20

SQUID amplifier

current–voltage converter using a single SQUID, SQUID array or other SQUID-based current sensor circuits

3.21

subgap region

lower branch of the hysteretic I – V characteristic of a tunnel junction where the voltage is less than 2Δ

3.22

subgap current

quasiparticle tunnelling current in the subgap region of a tunnel junction

Note 1 to entry: In Josephson tunnel junctions, the whole subgap region is observable when the DC Josephson effect is suppressed by applying a magnetic field parallel to the plane of the junction area.

3.23

superconducting strip detector

type of superconducting device that uses the local resistive change in a long superconducting strip because of measurand energy deposition

Note 1 to entry: The name for a photon detector, superconducting nanowire photon detector, is not recommended for most cases, since the dimensions of superconductors are often in discord with the current definition of "nanowire" in ISO/TS 80004-2:2015, in which "nanowire" or "nanofibre" is defined as nano-objects with two external dimensions in the nanoscale that are approximately 1 nm to 100 nm, and the third dimensions significantly larger. The dimensions of the superconducting strip type meet the definition of "nanoribbon" or "nanotape" in most cases.

Note 2 to entry: The terms "nanoribbon" and "nanotape" have one external dimension in the nanoscale and the other two external dimensions significantly larger (typically by more than 3 times). In addition, the two larger dimensions significantly differ from each other. "Nanostrip" is preferable to "nanoribbon" and "nanotape" for superconducting sensors and detectors.

Note 3 to entry: An example of the superconducting nanowires is the strip with the dimensions of 10 nm × 30 nm × 10 µm. The difference between the thickness and width is approximately less than 3 times. That superconductor can be called "superconducting nanowire photon detector".

3.24

superconducting tunnel junction detector

type of superconducting device that uses the change of electron tunnelling between two superconductors or a superconductor and a normal conductor separated by tunnelling barrier because of measurand energy deposition

3.25

temperature sensitivity

superconducting transition edge steepness that is defined by $d\ln R/d\ln T$ where R is the resistance and T is the temperature of TES

3.26

transition edge sensor detector

type of superconducting device that uses the resistive change within a sharp normal-to-superconducting transition as a temperature sensor because of measurand energy deposition

4 Symbols

Units, graphical and letter symbols shall be taken from the following standards:

- IEC 60027 (all parts);
- IEC 60417;
- IEC 60617;
- ISO 1000;
- ISO 7000.

Graphical symbols for use on equipment and diagrams, such as superconducting region, normal connection, superconducting connection, normal-superconducting boundary, Josephson junction, are defined in Annex C, and IEC 60417 and IEC 60617. Graphical symbols specific to other sensors or detectors are defined in other parts of IEC 61788.

5 Terminology and classification

5.1 Terminology

Table 1 lists the measurands which are defined as categories, objects, or physical quantities that induce energy deposition and are to be sensed or detected by superconducting sensors and detectors. The measurands, arranged in alphabetical order, are: atoms and molecules, elementary particles, physical quantities, and radiations. Each entry in Table 1 not only represents the measurand itself, but also its temporal or spatial distribution.

Any other terminology peculiar to one of the devices covered by this document shall be taken from the relevant IEC or ISO standards.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-22-1:2017

Table 1 – Measurands

Category	Object	Physical quantity
Atoms and molecules	Atoms	Count, energy, flux, time
	Organic molecules	Count, energy, flux, time
	Nonorganic molecules	Count, energy, flux, time
	Other (specify)	
Elementary particles	Dark matters	Count, energy, flux, time
	Electrons	Count, energy, flux, time
	Neutrinos	Count, energy, flux, time
	Neutrons	Count, energy, flux, time
	Photons	Count, energy, flux, time
	Protons	Count, energy, flux, time
	Positrons	Count, energy, flux, time
	Other (specify)	
Physical quantities	Capacitance	Amplitude
	Current	Amplitude
	Inductance	Amplitude
	Magnetic field	Strength, distribution
	Magnetic flux	Density, distribution
	Magnetic susceptibility	Amplitude
	Polarization	Amplitude
	Resistance	Amplitude
	Voltage	Amplitude
	Other (specify)	
Radiations	Alpha-particles	Count, energy, flux
	Beta-particles	Count, energy, flux
	Electromagnetic waves	Amplitude
	Gamma-rays	Count, energy, flux
	Optical radiation	Count, energy, flux
	X-rays	Count, energy, flux
	Other (specify)	

The objects for measurands fall into two classes: fields and physical quantities, and particles, as listed in Table 2. Based on these classes, detection mechanisms are classified into coherent detection for fields and physical quantities, and direct detection for particles.

Table 2 – Classification of measurands

Classification	Measurand category
Field and physical quantities	Physical quantities
	Radiations (electromagnetic waves)
Particles	Atoms and molecules
	Elementary particles
	Radiations (individual electromagnetic radiation quanta)

Table 3 lists the various types of sensors and detectors (alphabetical order). The sensors and detectors convert measurands to electronic signals. The word "sensor" tends to be used for devices that measure fields and physical quantities, while the word "detector" tends to be used for devices that measure single particles. When naming sensors or detectors, the following word order should be used for nomenclature: device structure or function; measurand; and a word of detector, magnetometer, mixer, sensor, or other words. Examples of full names and corresponding acronyms are also listed.

**Table 3 – Nomenclature of superconducting sensors and detectors:
type, full names, and acronym examples**

Type	Full names and acronym example
Metallic Magnetic Calorimetric (MMC) type	Metallic Magnetic Calorimetric α -ray Detector (MMC α -ray detector or MMCAD)
	Metallic Magnetic Calorimetric γ -ray Detector (MMC γ -ray detector or MMCGD)
	Metallic Magnetic Calorimetric X-ray Detector (MMC X-ray detector or MMCXD)
Microwave Kinetic Inductance (MKI) type	Microwave Kinetic Inductance Photon Detector (MKI photon detector or MKIPD)
	Microwave Kinetic Inductance X-ray Detector (MKI X-ray detector or MKIXD)
Superconducting Hot Electron Bolometric (SHEB) type	Superconducting Hot Electron Bolometric Photon Detector (SHEB photon detector or SHEBPD)
	Superconducting Hot Electron Bolometric Terahertz Mixer (SHEB terahertz mixer or SHEBTM)
Superconducting Quantum Interference Device (SQUID) type	Superconducting Quantum Interference Device Amplifier (SQUID amplifier or SQUIDA)
	Superconducting Quantum Interference Device Current Sensor (SQUID current sensor or SQUIDCS)
	Superconducting Quantum Interference Device Gradiometer (SQUID gradiometer or SQUIDG)
	Superconducting Quantum Interference Device Magnetometer (SQUID magnetometer or SQUIDM)
	Superconducting Quantum Interference Filter Magnetometer (SQIF magnetometer or SQIFM)
	Superconducting Quantum Interference Device Array Magnetometer (SQUID array magnetometer or SQUIDAM)
Superconducting Strip (SS) type	Superconducting Strip Electron Detector (SS electron detector or SSED)
	Superconducting Strip Ion Detector (SS ion detector or SSID)
	Superconducting Strip Particle Detector (SS particle detector or SSPD)
	Superconducting Strip Photon Detector (SS photon detector or SSPD)

Type	Full names and acronym example
Superconducting Tunnel Junction (STJ) type	Superconducting NanoStrip Photon Detector (SNS photon detector or SNSPD)
	Superconducting Tunnel Junction Ion Detector (STJ ion detector or STJID)
	Superconducting Tunnel Junction Terahertz Mixer (STJ terahertz mixer or STJTM)
	Superconducting Tunnel Junction Photon Detector (STJ photon detector or STJPD)
	Superconducting Tunnel Junction X-ray Detector (STJ X-ray detector or STJXD)
	Superconductor Insulator Superconductor Terahertz Mixer (SIS terahertz mixer or SISTM that is equivalent to STJTM)
Transition Edge Sensor (TES) type	Superconductor Normal-conductor Superconductor Mixer (SNS mixer or SNSM)
	Transition Edge Sensor α -ray Detector (TES α -ray detector or TESAD)
	Transition Edge Sensor γ -ray Detector (TES γ -ray detector or TESGD)
	Transition Edge Sensor Photon Detector (TES photon detector or TESPD)
Other	Transition Edge Sensor X-ray detector (TES X-ray detector or TESXD)
	Specify

NOTE The nomenclature has the word order of (device structure or function) – (a measurand) – (a word of detector, magnetometer, mixer, sensor, or other words). The term "nanowire" can be used only for a special case that superconducting strips have two external dimensions in the nanoscale that is approximately 1 nm to 100 nm; the difference between the first and second external dimensions is typically less than 3 times; and the third dimension significantly larger: for example a nanowire with 10 nm $\times$ 30 nm $\times$ 1 μ m. In IEC 61788-22, it is called "nanostrip" or "strip" because of a difference of considerably larger than 3 times in most cases, although nanotape or nanoribbon is possible. See also the ISO Online browsing platform: available at <https://www.iso.org/obp/ui#home>.

5.2 Classification

The operation of the sensors and detectors is classified into two categories: coherent detection and direct detection (Table 4). The devices used in the category of coherent detection include bolometers, sensors or mixers, while the devices used in the category of direct detection include calorimeters or detectors. For operating principles, see Annex A (coherent detection) and Annex B (direct detection).

Table 4 – Classification of detection principles

Detection principle	Type
Coherent detection for fields and physical quantities	SHEB, SQUID, STJ
Direct detection for particles	MMC, MKI, SS, STJ, TES

It should be noted that direct detectors have a sensitivity for single particles, and they can also measure a flux of particles. The issue is a difference between time response of superconducting devices and time interval of energy absorption of individual particles. For the superconducting sensors and detectors that use temperature rise because of measurand energy absorption, they are called "bolometer" or "calorimeter" depending on the time response. When the interval of absorption events is much shorter than the time response, the term "bolometer" is appropriate for flux measurement. On the other hand, when it is much longer than the time response, the term "calorimeter" is appropriate for particle counting.

6 Cryogenic operation condition

The superconducting sensors and detectors operate in cryogenic temperatures lower than T_c or the middle of normal-superconducting transition in order to hold a superconducting state or to use a sharp normal-superconducting transition for sensing or detecting measurands. The operation temperature range depends on the types. Specific cryogenic operation condition for each sensor or detector should be described in other parts of IEC 61788-22 for various types of sensors and detectors.

The cryogenic temperature can be obtained by liquid helium or other cryogenes, Gifford-McMahon (GM) coolers, pulse tube coolers, adiabatic demagnetization refrigerators (ADR), ^3He refrigerators, ^4He - ^3He dilution refrigerators, and other cryocoolers.

Performance of sensors and detectors is influenced by both cryogenic environment and implementation. The cryogenic environment and implementation should be specified in a standard for each sensor or detector and other separate standards.

7 Marking

7.1 Device identification

The marking on the device or on the packing shall enable clear identification of the device. The device shall be provided with a traceability code which enables back-tracing of the device to a certain production or inspection lot.

7.2 Packing

Marking on the packing shall state the following:

- a) the device identification code;
- b) the measurand, type, name, detection principle, and other informative information in Tables 1, 2, 3, and 4;
- c) the number of enclosed devices;
- d) the operating temperature range;
- e) the additional specification;
- f) the required precautions, if any.

8 Test and measurement procedures

The test and measurement methods should be described in a standard for each sensor or detector and other separate standards.

Annex A (informative)

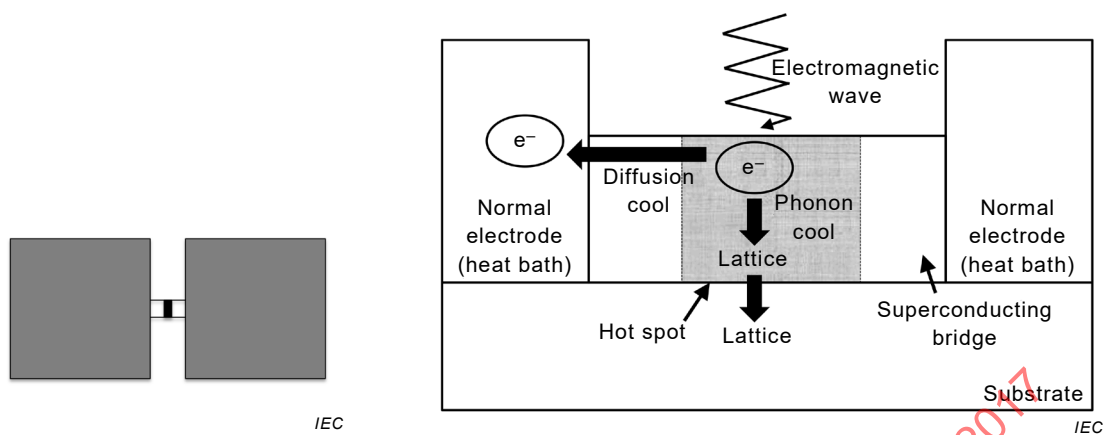
Coherent detection

A.1 Superconducting hot electron bolometric (SHEB) type

The SHEB type enables detection of sub-millimetre and far-IR radiation (0,3 THz to 10 THz). SHEBs are more often used as indirect (i.e. coherent or mixing) detectors, although direct detection is possible. In mixers, the electromagnetic field of the signal photons (ω_s) is mixed with a locally generated electromagnetic field at ω_0 frequency (called the local oscillator, LO). The result is a signal at the difference, or intermediate frequency, ω_{IF} , where $\omega_{IF} = \omega_0 - \omega_s$. The original signal in the sub-millimetre band is therefore down-converted into the microwave band, where more conventional low-noise electronics can amplify and process the signal. A SHEB is composed by a superconducting microbridge with nanometre or submicron dimensions, contacted by thick metallic pads. Sub-millimetre radiation signals are coupled into the microbridge through a lens and an on-chip antenna. The heterodyne mixing process makes use of the resistive transition between the superconducting state and the normal state of the superconducting bridge, induced by the heating of radiation signals. This transition produces a hot-spot. Two types of hot-spot relaxation are used as a detection mechanism: in the diffusion cooled SHEB the hot electrons diffuse to the surrounding thermal reservoir, while in the phonon cooled SHEB, the hot electrons are cooled through fast electron–phonon interaction.

Bolometers are electronic devices that convert measurands into heat, which can then be detected by a thermometer. Although conventional bolometers usually have antenna-shaped absorber, thermometer, heat sink, and thermal link as separate elements, in the SHEB type these various elements are combined. The thermal resistance $R = 1/G$ with the thermal conductance G provides the coefficient linking incident power P and change in temperature ΔT , such that $\Delta T = PR$. An important consideration in designing bolometers is the time taken for it to recover, given by $\tau = RC$, where C is the heat capacity. In SHEB, at a low temperature, the electron system in materials becomes decoupled from the phonon system, leading to a large R , while C of the electrons becomes small and proportional to T .

From the physics of device operation, the SHEB type can be categorized as a kind of TES. In general TES, temperature of both lattice and electron increase due to the incident photon or electromagnetic wave, while only the electron temperature does for SHEB type. Since the heat capacity C of the electron is not bigger than C of the lattice except for extremely low temperature, SHEB type can respond more quickly to the incident signal than general TES.



Two pads are connected by microbridge. The size of normal conducting hot spot region changes depending on absorbed energy.

a) SHEB type mixer concept

The signal and local oscillator powers and joule heating due to DC bias produce a hot spot whose length oscillates at $|\omega_0 - \omega_s|$ in the superconducting bridge.

b) Schematic of a hot electron bolometer

Figure A.1 – SHEB mixer

An example of the SHEB type is a device that consists of two thick metal pads that are connected or bridged by a small superconducting microbridge of NbN with a thickness of 3,5 nm, a width of 400 nm, and a length of 4 μm (see Figure A.1 a) and A.1 b). Other material examples are Nb, NbTiN, Al, and $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$.

An advantage of the SHEB type is that it operates at very high speeds through either fast phonon or electron diffusion cooling, which enables heterodyne detection of radiation with a frequency above about 1000 GHz that the STJ mixers cannot receive efficiently because of quasiparticle excitation above a superconducting energy gap. SHEBs can also be used for direct detection, but their main application is heterodyne detection.

A.2 Superconducting tunnel junction (STJ) type

The STJ structure is exactly the same as that of Josephson tunnel junctions (Figure A.2 a)), but the Josephson effect needs to be suppressed by a magnetic field applied in parallel to the junction surface. The STJ type enables coherent detection based on heterodyne mixing of measurand of electromagnetic waves in millimetre- and submillimetre-wave bands and a local oscillator frequency in order to downconvert frequencies into the microwave band by using strong non-linear I - V curves (Figure A.2 b)). The STJ mixers are frequently called superconductor insulator superconductor (SIS) mixers due to their sandwiched structure. STJ mixers operating at a cryogenic temperature (e.g. 4 K) are indispensable for frequencies less than about 1 000 GHz, in which there are no low-noise amplifiers. At the downconverted frequencies that are normally in the microwave frequency band, low-noise semiconductor-based amplifiers are available.

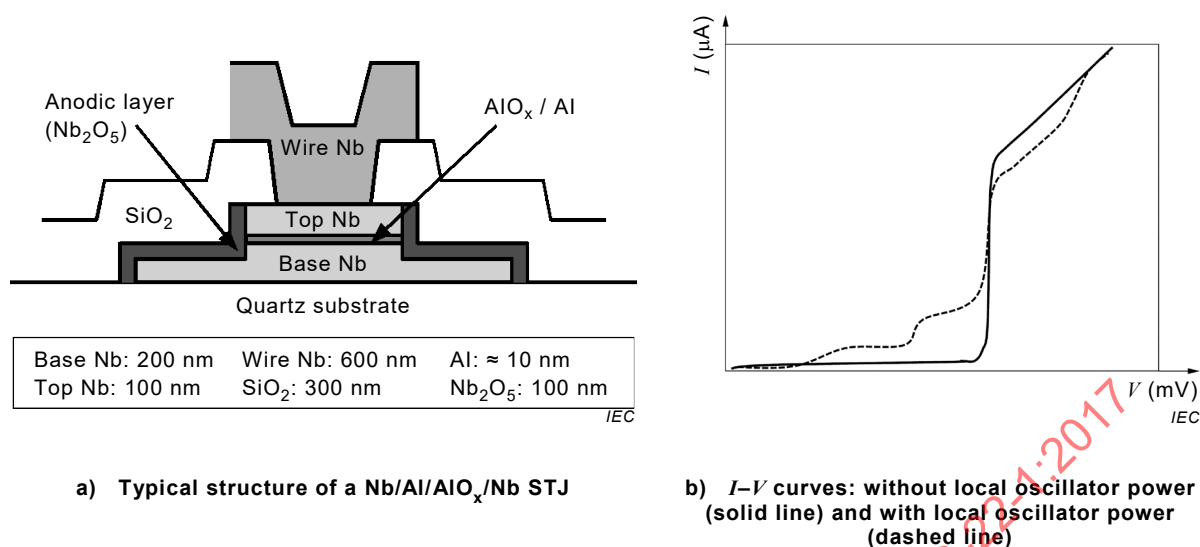


Figure A.2 – STJ mixer

An example of STJ is a Nb/Al/AIO_x/Nb junction, shown in Figure A.2 b). The size and critical current density decreases and increases, respectively, as the signal frequency increases so as to keep the normal resistance approximately constant. The typical size and critical current density of a junction at 500 GHz (0,6 mm in wavelength) are approximately 1 μm and 100×10^6 A/m² at 4,2K, respectively.

An advantage of STJ mixers is very high spectral resolution compared with direct detection of photons, although STJ mixers have a disadvantage in sensitivity.

A.3 Superconducting quantum interference device (SQUID) type

The SQUID type enables coherent detection of the quantum state of a superconducting loop containing one Josephson junction (RF SQUID) or two Josephson junctions (DC SQUID) (Figure A.3), based on magnetic flux quantization and the Josephson effect. The coherent state is influenced by magnetic flux coupled to the SQUID loop. By means of this flux coupling, any measurand that can be transformed into magnetic flux threading the SQUID loop can be measured by a SQUID sensor. Prominent examples are extremely sensitive SQUID magnetometers or current sensors. In addition, magnetic susceptibility and magnetic moment of materials can also be measured with SQUID sensors. Shielding current or penetration of magnetic flux quanta ($\Phi_0 = 2,0678 \times 10^{-15}$ Wb) into the superconducting SQUID loop results in periodic oscillations of the voltage vs. magnetic flux or the current vs. magnetic flux characteristics of SQUIDs. The period of these oscillations is one flux quantum Φ_0 . SQUID sensors can, however, have sensitivities better than one Φ_0 and can be used with or without a feedback circuit as a null detector of magnetic flux.

A low T_c SQUID made of niobium-based alloy is typically operated at 4,2 K (e.g. in liquid helium) and a high T_c SQUID is operated at 77 K (in liquid nitrogen). Fundamentally, operation principles of both SQUIDs are the same but the sensitivities are different. The noise level of the low T_c SQUID is the order of 1 fT/Hz^{1/2} and that of high T_c is 10 times larger.

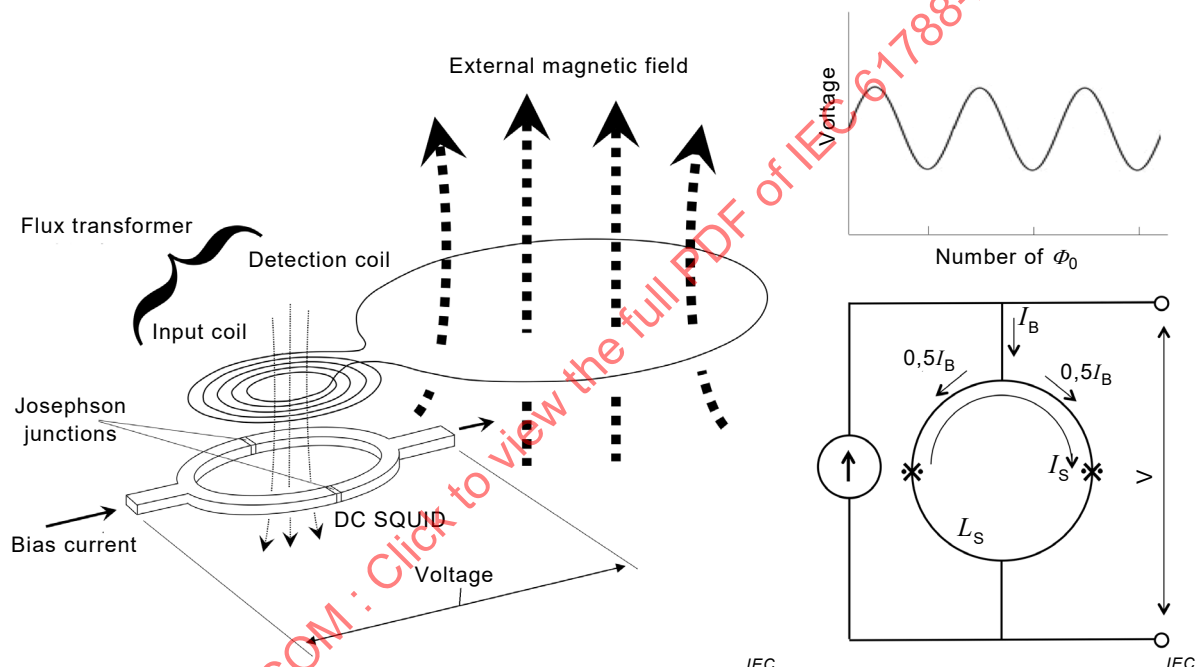
Figure A.3 a) is a schematic illustration of a typical magnetometer using a DC SQUID. A flux transformer consisting of a large detection coil and a spiral input coil is used. An external magnetic field is transformed into magnetic flux threading the SQUID loop by the transformer. A Φ_0 -periodic voltage vs. magnetic flux response is obtained (Figure A.3 b)).

A simplified equivalent circuit of a DC SQUID is shown in Figure A.3 b). A single DC SQUID is usually operated in a constant current-biased condition. The bias current (I_B) flows and splits into the two paths, each with currents $1/2 I_B$. The two Josephson junctions are located in the

superconducting loop. There is a normal resistance R associated with each Josephson junction. If the density of the magnetic flux threading the DC SQUID loop is the same as the density of the magnetic flux out of the loop, nothing happens. But if there is imbalance of the each density, the shielding current I_s is induced and flows in the loop to compensate the imbalance. I_s is expressed by $I_s = \phi/L_s$ (ϕ : total flux threading the SQUID loop, L_s : SQUID loop inductance).

The shielding current I_s is in the same direction as I_B in one of the branches of the superconducting loop, and is opposite to I_B in the other branch; the total current becomes $(I_B + I_s)/2$ in one branch and $(I_B - I_s)/2$ in the other. As soon as the current in either branch exceeds the critical current I_c of the Josephson junction, a voltage appears across the junction.

The value of the voltage across the junction periodically changes along with the flux in the loop. If the feedback technology FLL (Flux Locked Loop) is applied, the FLL output voltage is proportional to the change of the flux out of the SQUID loop.



a) SQUID type sensor concept: a magnetometer using a superconducting detection coil coupled to a DC SQUID via a flux transformer

b) Circuit diagram of a DC SQUID and the voltage vs. magnetic flux characteristics

Figure A.3 – DC SQUID

An example of SQUID is a Nb superconducting loop having two Josephson junctions of Nb/AlO_x/Al/Nb with a junction size of 1 μm , a critical current density of $25 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ at 4,2 K, and a junction normal resistance R of 8 Ω . Frequently, a spiral input coil that generates magnetic fields is integrated on the SQUID chip.

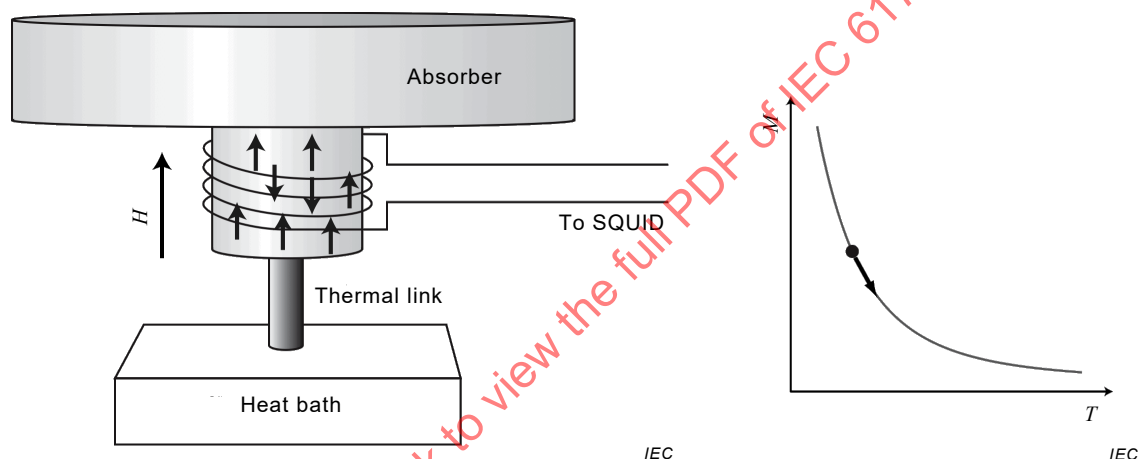
Fundamentally, SQUIDS are sensitive to magnetic flux. However, the use of input coils and flux transformers allows for the measurement of others quantities such as magnetic field and current.

Annex B (informative)

Direct detection

B.1 Metallic magnetic calorimetric (MMC) type

The MMC type enables direct detection based on the measurement of the change of magnetization of a paramagnetic sensor in a small magnetic field upon the deposition of measurand energy. The MMC type consists of a paramagnetic sensor whose magnetization changes upon temperature rise and a superconducting circuit that reads the magnetization change. The energy of each measurand (e.g. a photon) causes a temperature increase of an absorber attached to the paramagnetic sensor. The temperature rise results in a magnetic susceptibility change (or decrease in magnetization as shown in Figure B.1) of the absorber that is measured by the magnetometer under a small magnetic field. The absorber is thermally isolated from a low temperature thermal bath, so that the magnetization change is large enough compared with a noise level of the magnetometer.



An absorber is connected to a paramagnetic material, whose magnetization changes with increasing temperature.

Energy absorption of measurand in an absorber eventually results in a magnetization decrease that is measured by a SQUID.

a) MMC detector concept

b) Temperature dependence of paramagnetic sensor material (e.g. Au:Er)

Key

H magnetic field strength

M magnetization

T temperature

Figure B.1 – MMC detector

An example of the paramagnetic sensor is Au:Er paramagnetic metallic alloy that is a small concentration of erbium, 300 ppm¹ to 1000 ppm, in gold host. The paramagnetic sensor and the absorber are placed in a small magnetic field at a cryogenic temperature, typically 1 mT to 10 mT, and 25 mK. The temperature increase of the gold absorber results in a magnetization decrease as shown in Figure B.1 b). This change is read by a superconducting circuit using a SQUID. The response time of the spin system in Au:Er is fast (less than 1 μ s at 100 mK) due to strong coupling between the magnetic spins and conduction electrons in the metal. The

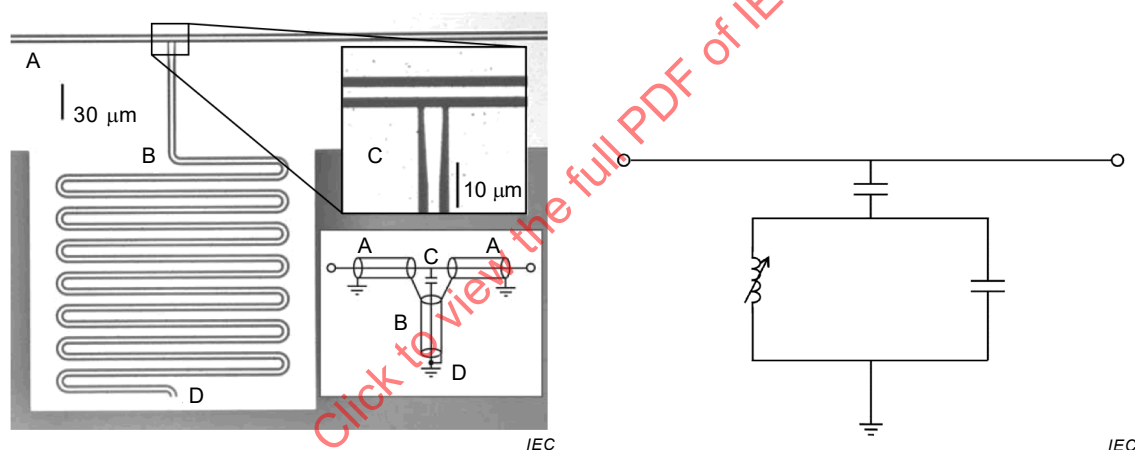
¹ ppm = parts per million

decay time of MMC signals depends upon the thermal link of the detector to a thermal bath at low temperatures.

An advantage of MMC detectors is that the energy resolution (ΔE) depends weakly on the heat capacity (C) of the absorber. It is expected that $\Delta E \propto C^{1/3}$, which means that magnetic calorimeters are suited for applications for which a large size absorber is needed.

B.2 Microwave kinetic inductance (MKI) type

The MKI type enables direct detection based on the measurement of the surface impedance change of a superconducting film through the kinetic inductance effect upon the deposition of measurand energy. The surface impedance change is dominated by the change of kinetic inductance of the superconductor. A microwave kinetic inductance detector (MKID) consists of electric components that form a resonator that is excited at a resonance frequency in a microwave frequency range (Figure B.2). The resonance curve changes when the energy of a measurand (e.g. a photon) is deposited in the superconducting inductor through the kinetic inductance change due to Cooper pair breaking. If the resonator is excited with the resonance frequency, the absorbed energy is determined by measuring the degree of phase change and the resonance amplitude change because of the change of resistance (Figure B.2 b)).



A coplanar waveguide is connected to a meander resonator.

Surface resistance change due to measurand energy deposition results in the changes of phase and resonance amplitude. By preparing different resonance frequencies for a large number of pixels, it is possible to distinguish the signal of each pixel.

a) MKI type detector concept

b) Circuit diagram

Key

- A coplanar wave guide
- B meander resonator
- C ground plane
- D ground

Figure B.2 – MKI detector

An example of the absorber is a TiN_x strip with a thickness of 60 nm and a length of 3 mm at 0,1 K. The TiN_x strip forms a meander line inductor that is coupled with a resonator capacitor. The resonator is connected to a coplanar waveguide used for resonator excitation by microwave in the frequency range from 0,1 GHz to 20 GHz and read out through a coupling capacitance (Figure B.2). The excitation and the measurement of the phase change and the resonance amplitude change are controlled by a sophisticated microwave component at room temperature.

An advantage of MKIDs is that large scale arrays are possible. The resonance frequencies of the resonators (pixels) can be tuned at a certain interval without overlap of the resonance curves of individual resonators. Thousands of pixels can be read out over a single microwave cable that is laid between a cryogenic temperature and room temperature.

B.3 Superconducting strip (SS) type

The SS type enables direct detection based on the measurement of resistive state occurrence induced by hot spot formation or other physical phenomena in a superconducting strip fabricated on a substrate after the deposition of measurand energy. Bias current is applied below the critical current values of the strip. This detector is a type of superconducting transition edge device. When the hot spot size is large enough so that current density in the surrounding area exceeds the critical current density, a resistive region appears across the width of the strip (Figure B.3). The resistive band relaxes and thermal energy inside dissipates into the substrate within a time considerably less than 1 ns.

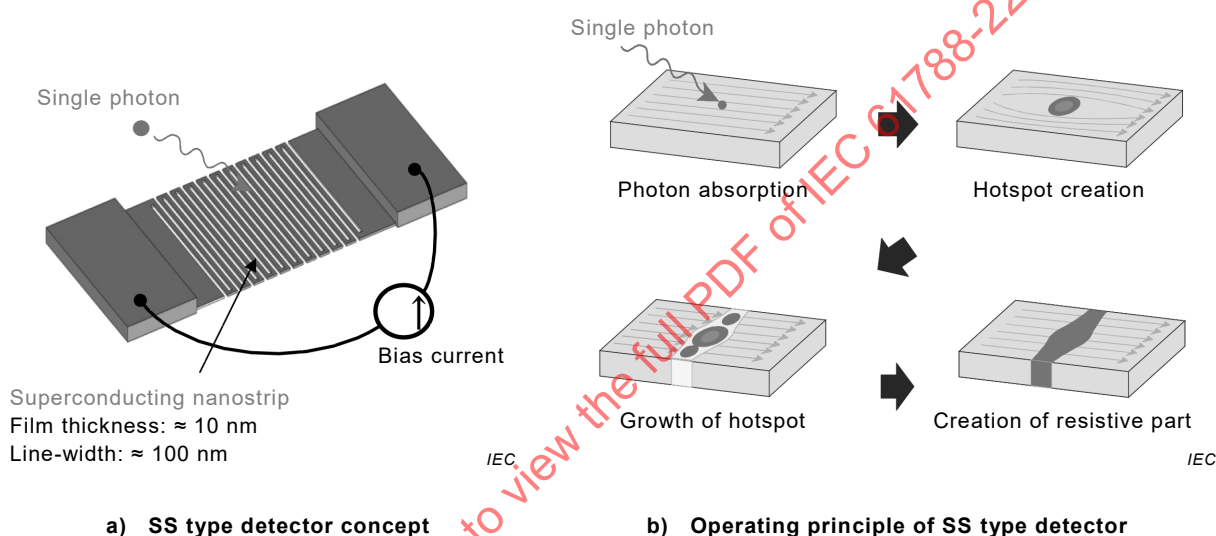


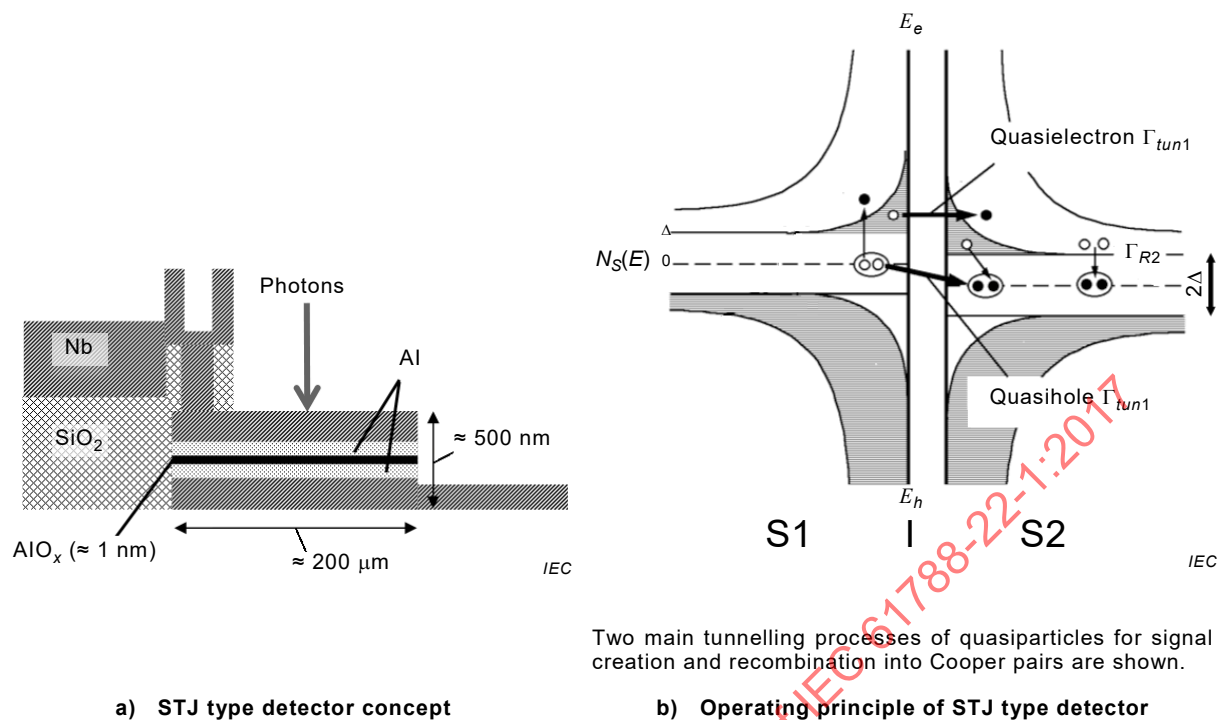
Figure B.3 – SS detector

An example of SS is a NbN strip with a thickness of 5 nm and a width of 100 nm. The NbN strip is cooled at 4 K. In order to obtain a reasonable detector size, strips are formed in a meander shape or in parallel lines.

An advantage of SS is a very fast response time (better than a few nanoseconds) compared with other sensors and detectors. The time response is mainly determined by kinetic inductance of strips, since intrinsic relaxation time of excitation in superconductors is much shorter than kinetic inductance limited time response. On the other hand, spectral resolution is unexpected or very poor.

B.4 Superconducting tunnel junction (STJ) type

The STJ type enables also direct detection based on quasiparticle excitation induced by measurand absorption. STJ has a structure that is exactly the same as that of Josephson junctions, but the Josephson effect needs to be suppressed by a magnetic field applied in parallel to the junction surface (Figure B.4 a)). The junction is biased within a subgap region that is less than $2\Delta/e$ and cooled considerably below T_c in order to avoid quasiparticle creation by thermal excitation. When either superconducting electrode absorbs the energy of any measurand, the Cooper pairs break and excess quasiparticles are created. The excess quasiparticles tunnelling through the thin insulator (I) between two superconducting electrodes (S1 and S2) result in the increase of tunnelling current across the junction (Figure B.4 b)). The number of quasiparticles is proportional to E/Δ . This current returns to zero according to quasiparticle lifetime.

**Key**

Δ superconducting energy gap

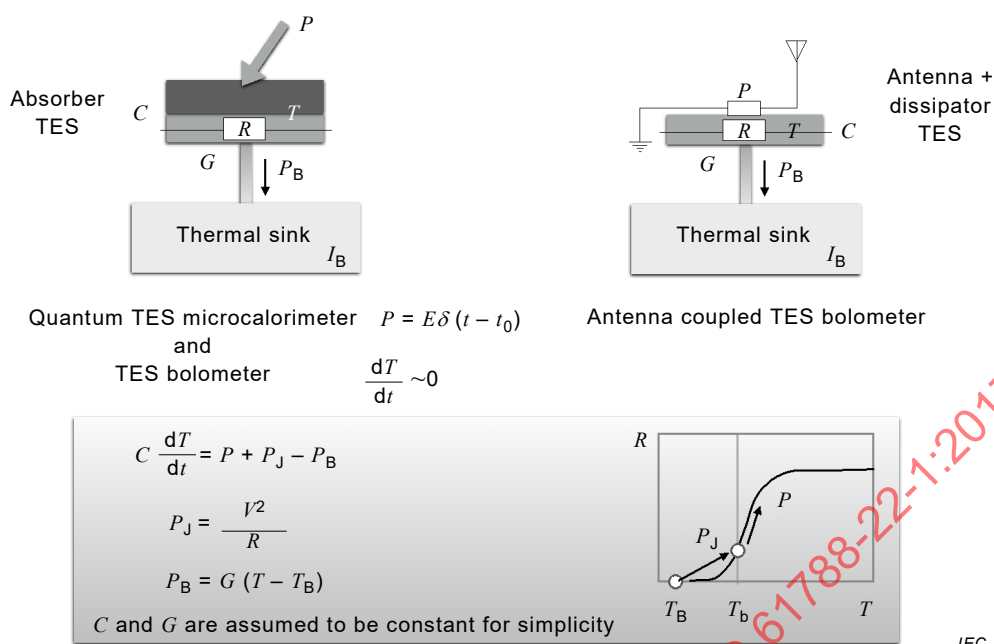
Figure B.4 – STJ detector

An example of STJ is a Nb/Al/AIO_x/Al/Nb junction with a junction size of 200 μm , a critical current density of $2 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ at 4,2 K, and a normal resistance of 20 Ω . The junction size is considerably larger than that of SIS mixers, because a substantially large sensitive area is required.

An advantage of STJ is the superconducting energy gap that ensures high stability against base temperature drift, when it is kept about one-tenth of T_c of the superconducting electrodes.

B.5 Transition edge sensor (TES) type

The TES type enables direct detection based on resistive change induced by equilibrium temperature change due to the deposition of measurand energy in the middle of the normal-superconducting transition of a film (Figure B.5). The temperature of TES is kept at a temperature in the middle of the normal-superconducting transition either by adjusting the temperature precisely or applying a constant voltage V across both ends of the film at a temperature somewhat lower than T_c of the superconducting film. In the latter case, the self-heating power of $P_J = V^2/R$ balances with the heat escape from the film to a heat bath, P_B . The R value of the film increases with increasing temperature within the normal-superconducting transition, which results in the decrease of P_J . Therefore, the temperature of the film is stabilized at a bias point, T_b , in the transition edge depending on the V value. Accordingly, for example, when a photon is absorbed in an absorber that is attached to TES causes a temperature rise, the self-heating power decreases. This provides negative feedback to make the TES return to the bias point more quickly than the thermal time constant. The effect is called electrothermal feedback (ETF) (Figure B.5). The negative current pulse upon the measurand absorption is read out by a SQUID current amplifier.



TES type detector concept and operating principle of TES type detector

Key

- C heat capacity of absorber
- E power of measurand
- G thermal conductance between absorber and thermal sink
- P external heat power due to measurand energy deposition
- P_B thermal flow through a connection between absorber and thermal sink
- P_J joule heating power due to bias voltage and resistance of transition edge sensor
- R resistance of transition edge sensor
- T temperature
- T_B base temperature
- T_b operating temperature of transition edge sensor
- t time
- V bias voltage

Figure B.5 – TES detector

An example of TES is a bilayer of Mo(60 nm)/Cu(200 nm) with an area of $400 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ on a Si_3N_4 membrane with a thickness of 250 nm at 70 mK. The TES is shunted by a Cu resistor of $0,2 \text{ m}\Omega$ that is considerably smaller than an R value at the bias position, which provides constant bias voltage. The negative current pulses for individual absorption events of measurand energy are converted into voltage pulses by a series SQUID array amplifier.

An advantage of TES is a combination of extremely high energy resolution of calorimeter performance and stable biasing in the middle of the narrow normal-superconducting transition width, of which the steep slope of R - T curve provides a highly sensitive temperature sensor. Furthermore, ETF can compensate for an inherent slow response of calorimeters and shorten pulse relaxation time.

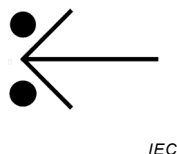
In this document, films for TES are defined as superconducting films, since they are influenced by superconductivity in spite of finite resistance. The devices that use the influence of superconductivity are called superconducting devices. Energy resolution depends on C .

Annex C (normative)

Graphical symbols for use on equipment and diagrams

C.1 Superconducting region, one superconducting connection

See Figure C.1.



The vertical two dots pair is the superconducting region and the perpendicular line with the right angle wedge is the superconducting connection.

Figure C.1 – Superconducting region, one superconducting connection

C.2 Superconducting region, one normal-conducting connection

See Figure C.2.

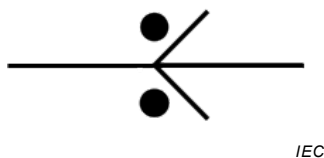


The vertical two dots pair is the superconducting region and the perpendicular line is the normal-conducting connection.

Figure C.2 – Superconducting region, one normal-conducting connection

C.3 Normal-superconducting boundary

See Figure C.3.



The vertical two dots pair is the superconducting region, the perpendicular line with the right angle wedge on the right hand side is the superconducting connection, and the perpendicular line on the left hand side is the normal-conducting connection.

**Figure C.3 – Superconducting region, one superconducting connection,
and one normal-conducting connection
(normal-superconducting boundary, IEC 60417-6370:2016-09)**

C.4 A variation

See Figure C.4.

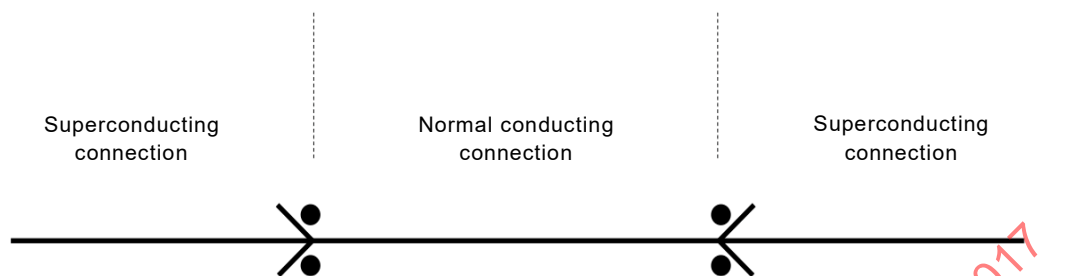


Figure C.4 – Series connection

C.5 Josephson junction

See Figure C.5.



The vertical two dots pair is the superconducting region, the perpendicular lines with the right angle wedges are the superconducting connections from both sides. The non-superconducting region which is normal conducting or insulating between two superconducting connections is extremely small.

Figure C.5 – Superconducting region, two superconducting connections with extremely small non-superconducting region (Josephson junction, IEC 60417-6371:2016-09)

The symbol of Figure C.3 and C.5 are registered with IEC 60417 Graphical symbols for use on equipment. The registration with IEC 60617 Graphical symbols for diagrams is in progress.

Bibliography

100 Years of Superconductivity, Horst Rogalla, Peter H. Kes (Editors) CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011

The SQUID Handbook, Fundamentals and Technology of SQUIDs and SQUID Systems, Volume I, John Clarke, Alex I. Braginski (Editors), Wiley, 2004

The SQUID Handbook, Applications of SQUIDs and SQUID Systems, Volume II, John Clarke, Alex I. Braginski (Editors), Wiley, 2006

Cryogenic Particle Detection, Christian Enss (Editor), Topics in Applied Physics (Book 99) Springer; 2005

ISO/TS 80004-2:2015, *Nanotechnologies – Vocabulary – Part 2: Nano-objects*

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-22-1:2017

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	30
INTRODUCTION.....	32
1 Domaine d'application	33
2 Références normatives	33
3 Termes et définitions	33
4 Symboles	37
5 Terminologie et classification.....	37
5.1 Terminologie	37
5.2 Classification	40
6 Condition de fonctionnement cryogénique	41
7 Marquage	41
7.1 Identification du dispositif.....	41
7.2 Boîtier.....	41
8 Procédures de mesure et essai	41
Annexe A (informative) Détection cohérente	42
A.1 Type bolométrique supraconducteur à électrons chauds (SHEB)	42
A.2 Type jonction supraconductrice à effet tunnel (STJ).....	43
A.3 Type interféromètre quantique supraconducteur (SQUID)	44
Annexe B (informative) Détection directe	46
B.1 Type calorimétrique magnétique métallique (MMC)	46
B.2 Type inductance cinétique à hyperfréquences (MKI)	47
B.3 Type bande supraconductrice (SS)	48
B.4 Type jonction supraconductrice à effet tunnel (STJ).....	49
B.5 Type bolomètre supraconducteur (TES)	50
Annexe C (normative) Symboles graphiques pour l'utilisation sur le matériel et les schémas	52
C.1 Région supraconductrice, une connexion supraconductrice	52
C.2 Région supraconductrice, une connexion conductrice normale.....	52
C.3 Limite supraconductrice normale.....	52
C.4 Variation.....	53
C.5 Jonction Josephson	53
Bibliographie.....	54
Figure A.1 – Mélangeur SHEB	43
Figure A.2 – Mélangeur STJ	44
Figure A.3 – DC SQUID	45
Figure B.1 – Détecteur MMC.....	46
Figure B.2 – Détecteur MKI.....	47
Figure B.3 – Détecteur SS	48
Figure B.4 – Détecteur STJ.....	49
Figure B.5 – Détecteur TES	50
Figure C.1 – Région supraconductrice, une connexion supraconductrice	52
Figure C.2 – Région supraconductrice, une connexion conductrice normale	52

Figure C.3 – Région supraconductrice, une connexion supraconductrice, et une connexion conductrice normale (limite supraconductrice normale, IEC 60417-6370:2016-09)	52
Figure C.4 – Connexion en série	53
Figure C.5 – Région supraconductrice, deux connexions supraconductrices avec une région non supraconductrice très petite (jonction Josephson, IEC 60417-6371:2016-09)	53
Tableau 1 – Mesurandes	38
Tableau 2 – Classification des mesurandes	38
Tableau 3 – Nomenclature des capteurs et détecteurs supraconducteurs: type, noms complets et exemples d'acronymes	39
Tableau 4 – Classification des principes de détection	40

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-22-1:2017

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

SUPRACONDUCTIVITÉ –

**Partie 22-1: Dispositifs électroniques supraconducteurs –
Spécification générique pour les capteurs et détecteurs**

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 61788-22-1 a été établie par le comité d'études 90 de l'IEC: Supraconductivité.

La présente version bilingue (2019-08) correspond à la version anglaise monolingue publiée en 2017-07.

Le texte anglais de cette norme est issu des documents 90/388/FDIS et 90/391/RVD.

Le rapport de vote 90/391/RVD donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

La version française de cette norme n'a pas été soumise au vote.

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 au document recherché. À cette date, le document sera

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-22-1:2017

INTRODUCTION

La supraconductivité offre différentes possibilités pour capter et détecter une grande variété de mesurandes. Plusieurs capteurs et détecteurs qui exploitent des caractéristiques comme le paramètre de bande interdite, la transition supraconductrice normale brusque, les caractéristiques non linéaires $I-V$, les états cohérents supraconducteurs, et la quantification du flux magnétique, ont été développés. Toutes ces propriétés peuvent être influencées par l'interaction avec les champs magnétiques, les photons, les ions, etc. Les capteurs et détecteurs supraconducteurs possèdent une performance extrêmement élevée pour la résolution énergétique, la réponse temporelle, et le bruit faible, la plupart ne pouvant être réalisés par tout autre phénomène.

Le terme "capteur" est généralement utilisé pour le mesurage des champs électriques stationnaires ou se déplaçant lentement, des grandeurs physiques comme le courant et la température. Le terme "détecteur", lui, est généralement utilisé pour les quanta uniques comme les photons allant des infrarouges aux rayons γ et les particules individuelles. La frontière entre les "capteurs" et les "détecteurs" reste cependant ambiguë. Par conséquent, dans le présent document, les termes "capteur" et "détecteur" sont utilisés. De plus, il est possible qu'un détecteur utilise un capteur, par exemple un détecteur de rayons X utilisant un bolomètre supraconducteur qui mesure l'élévation de la température due au dépôt d'énergie du mesurande. Dans le présent document, la terminologie "détecteur de rayons X par bolomètre supraconducteur" est utilisée pour la détection des rayons X utilisant un bolomètre supraconducteur.

Les capteurs et détecteurs supraconducteurs ont été appliqués à une variété de domaines comprenant le diagnostic médical, les télécommunications, l'exploration minière, les instruments astronomiques, le traitement de l'information quantique, et les instruments analytiques. Pour les utilisateurs, la normalisation IEC est nécessaire en raison d'une terminologie ambiguë, du manque de symboles graphiques des schémas et du manque de méthodes d'essai.

IECNORM.COM : Click to view the PDF of IEC 61788-22-1:2017

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 22-1: Dispositifs électroniques supraconducteurs – Spécification générique pour les capteurs et détecteurs

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61788-22-1 décrit les éléments généraux relatifs aux spécifications des capteurs et détecteurs supraconducteurs, qui sont la base des spécifications données dans les autres parties de l'IEC 61788 pour différents types de capteurs et de détecteurs. Les capteurs et détecteurs décrits sont principalement constitués de matériaux supraconducteurs et dépendent des phénomènes supraconducteurs ou relatifs. Les objets à mesurer (mesurandes) comprennent les champs magnétiques, les ondes électromagnétiques, les photons de différentes énergies, les électrons, les ions, les particules α , et autres.

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 60027 (toutes les parties), *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*

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

IEC 60417, *Symboles graphiques utilisables sur le matériel* (disponible à l'adresse: <http://www.graphical-symbols.info>)

IEC 60617, *Symboles graphiques pour schémas* (disponible à l'adresse: <http://std.iec.ch/iec60617>)

ISO 1000, *Unités SI et recommandations pour l'emploi de leurs multiples et de certaines autres unités*

ISO 7000, *Symboles graphiques utilisables sur le matériel – Symboles enregistrés* (disponible à l'adresse: <http://www.graphical-symbols.info>)

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'IEC 60050-815 et les suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

3.1

rétroaction positive additionnelle

RPA

méthode qui améliore le ratio de transformation tension-flux en utilisant une résistance et en couplant une bobine à l'anneau SQUID

3.2

paramètre de modulation du courant critique

β_L

paramètre défini par $2LI_c/\Phi_0$, où L est l'inductance de la boucle supraconductrice du SQUID, I_c est le courant critique d'une jonction Josephson pour les DC-SQUID, et un paramètre défini par $2\pi LI_c/\Phi_0$ pour les RF SQUID

Note 1 à l'article: Le terme "paramètre de blindage" peut également être utilisé.

3.3

paramètre de Stewart-McCumber

β_C

paramètre défini par $2\pi I_c R_n^2 C / \Phi_0$, où R_n est la résistance à l'état normal d'une jonction Josephson, et C est la capacité d'une jonction Josephson

3.4

jonction de pont

jonction formée de deux supraconducteurs reliés par un pont supraconducteur de petite section

Note 1 à l'article: Le terme "micropont" peut également être utilisé.

3.5

courant critique

I_c

courant continu maximal qui peut être considéré comme passant à travers une jonction Josephson sans résistance

3.6

densité de courant critique

J_c

courant critique divisé par la section transversale du conducteur ou par l'aire de jonction de la jonction Josephson

3.7

bobine de rétroaction

bobine couplée de façon inductive à un SQUID fonctionnant en mode boucle fermée de flux

3.8

boucle fermée de flux

BFF

méthode qui améliore la linéarité et la plage dynamique d'un SQUID en utilisant la rétroaction négative pour maintenir le nombre de flux constant dans l'anneau SQUID

3.9

gradiomètre

configuration des boucles supraconductrices couplées à un magnétomètre SQUID, ou de plusieurs magnétomètres SQUID disposés de façon à rester insensible aux champs magnétiques homogènes, ou sensible aux variations de champ magnétique

3.10**détecteur calorimétrique magnétique métallique**

type de dispositif supraconducteur pour lequel l'augmentation de température d'un absorbeur métallique est mesurée en captant le changement d'aimantation de l'absorbeur à cause du dépôt d'énergie du mesurande

3.11**détecteur de l'inductance cinétique à hyperfréquences**

type de dispositif supraconducteur qui utilise le changement d'impédance de surface à hyperfréquences d'une bande supraconductrice à cause du dépôt d'énergie du mesurande

3.12**résistance à l'état normal**

résistance d'un supraconducteur ou jonction Josephson à l'état normal

Note 1 à l'article: Dans un supraconducteur ou un bolomètre supraconducteur, il s'agit de la résistance à une température juste au-dessus de la transition supraconductrice.

Note 2 à l'article: Dans une jonction Josephson, il s'agit de la résistance à effet tunnel à une tension de polarisation bien supérieure à $2\Delta/e$.

3.13**gradiomètre planaire**

type de configuration de la bobine de sondage qui mesure une variation de champ magnétique dans le plan de la bobine de sondage couplée à un SQUID

3.14**quasi-particule**

excitation combinant les propriétés d'un électron et d'un trou créé en coupant une paire de Cooper dans un supraconducteur

3.15**mélangeur bolométrique supraconducteur à électrons chauds**

type de dispositif supraconducteur qui utilise une jonction hétérodyne avec la transition résistive de l'état supraconducteur vers l'état normal dans un micropont supraconducteur à cause du dépôt d'énergie du mesurande

3.16**capteur à interféromètre quantique supraconducteur****capteur SQUID**

type de dispositif supraconducteur qui utilise une interférence quantique se produisant dans un circuit électrique fermé contenant une ou plusieurs jonctions Josephson

Note 1 à l'article: Chaque mesurande, par exemple les champs magnétiques ou les courants électriques, transformé en changement de flux magnétique suivant la structure supraconductrice peut être capté par un SQUID.

Note 2 à l'article: L'abréviation "SQUID" est dérivée du terme anglais développé correspondant "superconducting quantum interference device".

3.17**matrice SQUID**

dispositif composé de matrices de plusieurs SQUID en série et/ou parallèle

3.18**nano-SQUID**

dispositif dont la dimension de boucle la plus grande est inférieure à 500 nm

3.19

anneau SQUID

structure supraconductrice multiple qui contient une ou plusieurs jonctions Josephson

Note 1 à l'article: Le terme "boucle SQUID" peut également être utilisé.

3.20

amplificateur SQUID

convertisseur courant-tension qui utilise un SQUID unique, une matrice SQUID ou d'autres circuits à capteur de courant se fondant sur un SQUID

3.21

région de la bande inférieure

branche inférieure de la caractéristique hystérétique $I-V$ d'une jonction tunnel pour laquelle la tension est inférieure à 2Δ

3.22

courant de la bande inférieure

courant tunnel de quasi-particule dans la région de la bande inférieure d'une jonction tunnel

Note 1 à l'article: Dans les jonctions à effet tunnel Josephson, la région entière de la bande inférieure est observable lors que l'effet Josephson continu est supprimé par l'application d'un champ magnétique parallèle au plan de la zone de jonction.

3.23

détecteur à bande supraconductrice

type de dispositif supraconducteur qui utilise le changement résistif local d'une longue bande supraconductrice à cause du dépôt d'énergie du mesurande

Note 1 à l'article: Le nom d'un détecteur de photon, détecteur de photon nanofil supraconducteur, n'est pas recommandé dans la plupart des cas, puisque les dimensions des supraconducteurs sont souvent en désaccord avec la définition actuelle de "nanofil" de l'ISO/TS 80004-2:2015, dans laquelle les "nanofils" ou "nanofibres" sont définis comme des nano-objets ayant deux dimensions externes à l'échelle nanométrique d'environ 1 nm à 100 nm, et la troisième dimension bien plus importante. Les dimensions du type bande supraconductrice satisfont à la définition de "nanoruban" dans la plupart des cas.

Note 2 à l'article: Le terme "nanoruban" a une dimension externe à l'échelle nanométrique et les deux autres dimensions externes bien plus importantes (typiquement plus de 3 fois plus grandes). De plus, les deux dimensions les plus grandes sont significativement différentes l'une de l'autre. "Nanobande" est préférable à "nanoruban" pour les capteurs et détecteurs supraconducteurs.

Note 3 à l'article: Un exemple de nanofil supraconducteur est la bande aux dimensions de $10 \text{ nm} \times 30 \text{ nm} \times 10 \text{ }\mu\text{m}$. La différence entre l'épaisseur et la largeur est presque inférieure à 3 fois. Ce supraconducteur peut être nommé "détecteur de photon nanofil supraconducteur".

3.24

détecteur à jonction supraconductrice à effet tunnel

type de dispositif supraconducteur qui utilise le changement à effet tunnel des électrons entre deux supraconducteurs ou entre un supraconducteur et un conducteur normal séparé par une barrière à effet tunnel du fait du dépôt d'énergie du mesurande

3.25

sensibilité à la température

raideur des bords de transition supraconductrice définie par $d\ln R/d\ln T$, où R est la résistance et T est la température du bolomètre supraconducteur

3.26

détecteur bolométrique supraconducteur

type de dispositif supraconducteur qui utilise le changement résistif dans une transition supraconductrice brusque à normale comme capteur de température du fait du dépôt d'énergie du mesurande

4 Symboles

Les unités et symboles graphiques doivent être tirés des normes suivantes:

- IEC 60027 (toutes les parties);
- IEC 60417;
- IEC 60617;
- ISO 1000;
- ISO 7000.

Les symboles graphiques pour l'utilisation sur le matériel et les schémas, comme la région supraconductrice, la connexion normale, la connexion supraconductrice, la limite supraconductrice normale, la jonction Josephson, sont définis à l'Annexe C ainsi que dans l'IEC 60417 et dans l'IEC 60617. Les symboles graphiques spécifiques à d'autres capteurs ou détecteurs sont définis dans d'autres parties de l'IEC 61788.

5 Terminologie et classification

5.1 Terminologie

Le Tableau 1 énumère les mesurandes définis en catégories, objets ou grandeurs physiques qui induisent un dépôt d'énergie et qui doivent être captés ou détectés par des capteurs ou détecteurs supraconducteurs. Les mesurandes, organisés par ordre alphabétique, sont: les atomes et molécules, les particules élémentaires, les grandeurs physiques, et les rayonnements. Chaque entrée du Tableau 1 représente également la distribution temporelle ou spatiale du mesurande.

Toute autre terminologie spécifique à l'un des dispositifs couverts par le présent document doit être tirée des normes IEC ou ISO correspondantes.

Tableau 1 – Mesurandes

Catégorie	Objet	Grandeur physique
Atomes et molécules	Atomes	Décompte, énergie, flux, durée
	Molécules organiques	Décompte, énergie, flux, durée
	Molécules non organiques	Décompte, énergie, flux, durée
	Autre (spécifier)	
Particules élémentaires	Matières noires	Décompte, énergie, flux, durée
	Électrons	Décompte, énergie, flux, durée
	Neutrinos	Décompte, énergie, flux, durée
	Neutrons	Décompte, énergie, flux, durée
	Photons	Décompte, énergie, flux, durée
	Protons	Décompte, énergie, flux, durée
	Positrons	Décompte, énergie, flux, durée
	Autre (spécifier)	
Grandeurs physiques	Capacité	Amplitude
	Courant	Amplitude
	Inductance	Amplitude
	Champ magnétique	Force, distribution
	Flux magnétique	Densité, distribution
	Susceptibilité magnétique	Amplitude
	Polarisation	Amplitude
	Résistance	Amplitude
	Tension	Amplitude
	Autre (spécifier)	
Rayonnements	Particules alpha	Décompte, énergie, flux
	Particules bêta	Décompte, énergie, flux
	Ondes électromagnétiques	Amplitude
	Rayons gamma	Décompte, énergie, flux
	Rayonnement optique	Décompte, énergie, flux
	Rayons X	Décompte, énergie, flux
	Autre (spécifier)	

Les objets des mesurandes tombent dans deux classes: les champs et les grandeurs physiques, et les particules, comme cela est énuméré dans le Tableau 2. Selon ces classes, les mécanismes de détection sont classés en détection cohérente pour les champs et les grandeurs physiques, et en détection directe pour les particules.

Tableau 2 – Classification des mesurandes

Classification	Catégorie de mesurande
Champs et grandeurs physiques	Grandeurs physiques
	Rayonnements (ondes électromagnétiques)
Particules	Atomes et molécules
	Particules élémentaires
	Rayonnements (quanta de rayonnement électromagnétique individuel)

Le Tableau 3 énumère les différents types de capteurs et détecteurs (par ordre alphabétique). Les capteurs et détecteurs convertissent les mesurandes en signaux électriques. Le terme "capteur" est plutôt utilisé pour les dispositifs qui mesurent les champs et grandeurs physiques, tandis que le terme "détecteur" est plutôt utilisé pour les dispositifs qui mesurent les particules uniques. Lors de l'appellation des capteurs et détecteurs, il convient d'utiliser l'ordre des mots suivant pour la nomenclature: structure ou fonction du dispositif; mesurande; et un mot pour le détecteur, magnétomètre, mélangeur, capteur, ou autres mots. Des exemples de noms complets et leurs acronymes correspondants sont également énumérés.

Tableau 3 – Nomenclature des capteurs et détecteurs supraconducteurs: type, noms complets et exemples d'acronymes

Type	Noms complets et exemple d'acronyme
Type calorimétrique magnétique métallique (MMC – <i>metallic magnetic calorimetric</i>)	Détecteur calorimétrique magnétique métallique à rayon α (Détecteur MMC à rayon α ou MMCAD)
	Détecteur calorimétrique magnétique métallique à rayon γ (Détecteur MMC à rayon γ ou MMCGD)
	Détecteur calorimétrique magnétique métallique à rayon X (Détecteur MMC à rayon X ou MMCXD)
Type inductance cinétique à hyperfréquences (MKI – <i>microwave kinetic inductance detector</i>)	Détecteur de photon à inductance cinétique à hyperfréquences (Détecteur de photon MKI ou MKIPD)
	Détecteur de rayons X à inductance cinétique à hyperfréquences (Détecteur de rayons X MKI ou MKIXD)
Type bolométrique supraconducteur à électrons chauds (SHEB – <i>superconducting hot electron bolometric</i>)	Détecteur de photon bolométrique supraconducteur à électrons chauds (Détecteur de photon SHEB ou SHEBPD)
	Mélangeur d'onde térahertz bolométrique supraconducteur à électrons chauds (Mélangeur d'onde térahertz SHEB ou SHEBTM)
Type interféromètre quantique supraconducteur (SQUID – <i>superconducting quantum interference device</i>)	Amplificateur interféromètre quantique supraconducteur (Amplificateur SQUID ou SQUIDA)
	Capteur de courant à interféromètre quantique supraconducteur (Capteur de courant SQUID ou SQUIDCS)
	Gradiomètre interféromètre quantique supraconducteur (Gradiomètre SQUID ou SQUIDG)
	Magnétomètre interféromètre quantique supraconducteur (Magnétomètre SQUID ou SQUIDM)
	Magnétomètre filtre à interférence quantique supraconducteur (Magnétomètre SQIF ou SQIFM)
	Magnétomètre à matrice interféromètre quantique supraconducteur (Magnétomètre à matrice SQUID ou SQUIDAM)
Type bande supraconductrice (SS – <i>superconducting strip</i>)	Détecteur d'électron à bande supraconductrice (Détecteur d'électron SS ou SSPD)
	Détecteur d'ion à bande supraconductrice (Détecteur d'ion SS ou SSID)
	Détecteur de particules à bande supraconductrice (Détecteur de particules SS ou SSPD)
	Détecteur de photon à bande supraconductrice (Détecteur de photon SS ou SSPD)

Type	Noms complets et exemple d'acronyme
	Détecteur de photon à nanobande supraconductrice (Détecteur de photon SNS ou SNSPD)
Type jonction supraconductrice à effet tunnel (STJ – <i>superconducting tunnel junction</i>)	Détecteur d'ion à jonction supraconductrice à effet tunnel (Détecteur d'ion STJ ou STJID)
	Mélangeur d'onde térahertz supraconducteur à effet tunnel (Mélangeur d'onde térahertz STJ ou STJTM)
	Détecteur de photon à jonction supraconductrice à effet tunnel (Détecteur de photon STJ ou STJPD)
	Détecteur de rayons X à jonction supraconductrice à effet tunnel (Détecteur de rayons X STJ ou STJXD)
	Mélangeur d'onde térahertz supraconducteur-isolant-supraconducteur (Mélangeur d'onde térahertz SIS ou SISTM équivalent à STJTM)
	Mélangeur d'onde supraconducteur-conducteur-normal-supraconducteur (Mélangeur SNS ou SNSM)
Type bolomètre supraconducteur (TES – <i>transition edge sensor</i>)	Détecteur à rayon α bolométrique supraconducteur (Détecteur à rayon α TES ou TESAD)
	Détecteur à rayon γ bolométrique supraconducteur (Détecteur à rayon γ TES ou TESGD)
	Détecteur de photon bolométrique supraconducteur (Détecteur de photon TES ou TESPD)
	Détecteur de rayons X bolométrique supraconducteur (Détecteur de rayons X TES ou TESXD)
Autre	Spécifier

NOTE La nomenclature se fait dans l'ordre: mot de la structure ou la fonction de l'appareil – un mesurande – un mot pour le détecteur, magnétomètre, mélangeur, capteur, ou autre. Le terme "nanofil" ne peut être utilisé que pour le cas spécial dans lequel les bandes supraconductrices ont deux dimensions externes à l'échelle nanométrique d'environ 1 nm à 100 nm; la différence entre la première et la deuxième dimension externe est typiquement inférieure à 3 fois; la troisième dimension est significativement plus grande: par exemple un nanofil de 10 nm × 30 nm × 1 µm. Dans l'IEC 61788-22, il est appelé "nanobande" ou "bande" du fait de la différence bien supérieure à 3 fois dans la plupart des cas, bien que "nanobande" ou "nanoruban" est aussi possible. Voir également l'ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp/ui#home>.

5.2 Classification

Le fonctionnement des capteurs et détecteurs est classé en deux catégories: détection cohérente et détection directe (Tableau 4). Les dispositifs utilisés dans la catégorie "détection cohérente" comprennent les bolomètres, les capteurs ou mélangeurs, tandis que les dispositifs utilisés dans la catégorie "détection directe" comprennent les calorimètres ou les détecteurs. Pour les principes de fonctionnement, voir l'Annexe A (détection cohérente) et l'Annexe B (détection directe).

Tableau 4 – Classification des principes de détection

Principe de détection	Type
Détection cohérente pour les champs et grandeurs physiques	SHEB, SQUID, STJ
Détection directe pour les particules	MMC, MKI, SS, STJ, TES

Il convient de noter que les détecteurs directs ont une sensibilité pour les particules uniques, et qu'ils peuvent également mesurer un flux de particules. Le problème est la différence entre la réponse temporelle des dispositifs supraconducteurs et l'intervalle temporel de l'absorption d'énergie des particules individuelles. Pour les capteurs et détecteurs supraconducteurs qui utilisent l'augmentation de la température du fait de l'absorption d'énergie du mesurande, ils sont appelés "bolomètre" ou "calorimètre", selon la réponse temporelle. Lorsque l'intervalle des événements d'absorption est bien plus petit que la réponse temporelle, le terme "bolomètre" est approprié au mesurage de flux. Lorsqu'il est bien plus long que la réponse temporelle, le terme "calorimètre" est approprié au comptage des particules.

6 Condition de fonctionnement cryogénique

Les capteurs et détecteurs supraconducteurs fonctionnent à des températures cryogéniques inférieures à T_c ou au milieu de la transition normale-supraconductrice afin de maintenir un état supraconducteur ou d'utiliser une transition supraconductrice normale brusque pour capter ou détecter les mesurandes. La plage de températures de fonctionnement dépend des types. Il convient de décrire la condition de fonctionnement cryogénique spécifique pour chaque capteur ou détecteur dans les autres parties de l'IEC 61788-22 pour différents types de capteurs ou détecteurs.

La température cryogénique peut être obtenue par hélium liquide ou autre cryogène, refroidisseurs Gifford-McMahon (GM), refroidisseurs à tube à gaz pulsé, réfrigérateurs à désaimantation adiabatique, réfrigérateurs ^3He , réfrigérateurs à dilution $^3\text{He}/^4\text{He}$, et autres cryoréfrigérateurs.

La performance des capteurs et détecteurs est influencée par l'environnement cryogénique et la mise en œuvre. Il convient de spécifier l'environnement cryogénique et la mise en œuvre dans une norme pour chaque capteur et détecteur et dans d'autres normes séparées.

7 Marquage

7.1 Identification du dispositif

Le marquage sur le dispositif ou sur le boîtier doit permettre une identification claire du dispositif. Le dispositif doit être fourni avec un code de traçabilité qui permet de le suivre dans un lot particulier de production ou d'inspection.

7.2 Boîtier

Le marquage sur le boîtier doit présenter ce qui suit:

- a) le code d'identification du dispositif;
- b) le mesurande, type, nom, principe de détection et autres informations des Tableaux 1, 2, 3 et 4;
- c) le nombre de dispositifs enveloppés;
- d) la plage de températures de fonctionnement;
- e) les spécifications supplémentaires;
- f) les précautions exigées, le cas échéant.

8 Procédures de mesure et essai

Il convient de spécifier les méthodes de mesure et les essais dans une norme pour chaque capteur ou détecteur et dans d'autres normes séparées.

Annexe A (informative)

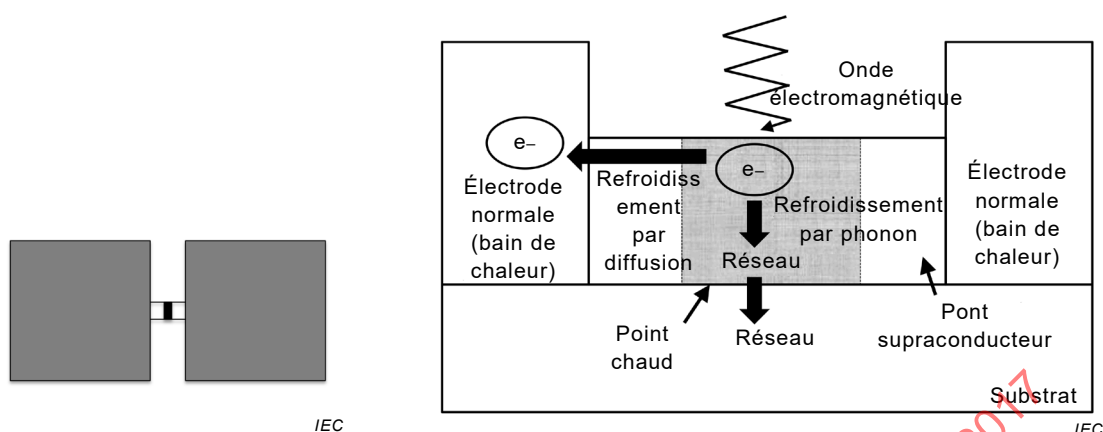
Détection cohérente

A.1 Type bolométrique supraconducteur à électrons chauds (SHEB)

Le type SHEB permet la détection des rayonnements sous-millimétriques et infrarouges lointains (0,3 THz à 10 THz). Les SHEB sont plus souvent utilisés comme détecteurs indirects (c'est-à-dire cohérents ou mélangeurs), bien que la détection directe soit possible. Dans les mélangeurs, le champ électromagnétique des photons de signal (ω_s) est mélangé à un champ électromagnétique généré localement à la fréquence ω_0 (appelé oscillateur local, LO – *local oscillator*). Le résultat est un signal à la fréquence de différence ou intermédiaire, ω_{IF} , où $\omega_{IF} = \omega_0 - \omega_s$. Le signal d'origine dans la bande sous-millimétrique est par conséquent converti dans la bande à hyperfréquences, où de l'électronique à faible bruit plus conventionnel peut amplifier et traiter le signal. Un SHEB est composé d'un micropont supraconducteur aux dimensions nanométriques ou submicroniques, en contact avec des plages métalliques épaisses. Les signaux de rayonnement sous-millimétriques sont couplés dans le micropont à travers un objectif et une antenne sur puce. Le processus de mélange hétérodyne utilise la transition résistive entre l'état supraconducteur et l'état normal du pont supraconducteur, induite par l'échauffement des signaux de rayonnement. Cette transition produit un point chaud. Deux types de relaxation de point chaud sont utilisés comme mécanisme de détection: dans le SHEB refroidi par diffusion, les électrons chauds diffusent au réservoir thermique environnant, tandis que dans le SHEB refroidi par phonon, les électrons chauds sont refroidis par une interaction rapide électron-phonon.

Les bolomètres sont des dispositifs électroniques qui convertissent les mesurandes en chaleur, qui peut alors être détectée par un thermomètre. Bien que les bolomètres conventionnels possèdent généralement un absorbeur en forme d'antenne, un thermomètre, un dissipateur thermique, et un protecteur thermique en tant qu'éléments séparés, dans le type SHEB ces différents éléments sont combinés. La résistance thermique $R = 1/G$ avec la conductance thermique G fournit la puissance incidente de liaison du coefficient P et le changement de température ΔT , de façon à ce que $\Delta T = PR$. Un élément important dans la conception des bolomètres est le temps de rétablissement, donné par $\tau = RC$, où C est la capacité thermique. Dans un SHEB, à une faible température, le système d'électron dans les matériaux est découplé du système de phonon, ce qui entraîne une grande R , tandis que la C des électrons se réduit et devient proportionnelle à T .

Le type SHEB peut être catégorisé comme un genre de TES à partir des propriétés physiques du fonctionnement du dispositif. Dans les TES généraux, la température du réseau et de l'électron augmente à cause des photons ou de l'onde électromagnétique incidents, tandis que seule la température de l'électron augmente dans le type SHEB. Puisque la capacité thermique C de l'électron n'est pas plus importante que la C du réseau, sauf pour les températures extrêmement faibles, le type SHEB peut répondre plus rapidement au signal incident que les TES généraux.



Deux plaques sont reliées par le micropont. La taille de la région du point chaud conducteur normal change selon l'énergie absorbée.

L'échauffement par effet Joule et la puissance du signal et de l'oscillateur local induits par la polarisation en courant continu produisent un point chaud dont la longueur oscille à $|\omega_0 - \omega_s|$ dans le pont supraconducteur.

a) Concept de mélangeur de type SHEB

b) Schéma d'un bolomètre à électrons chauds

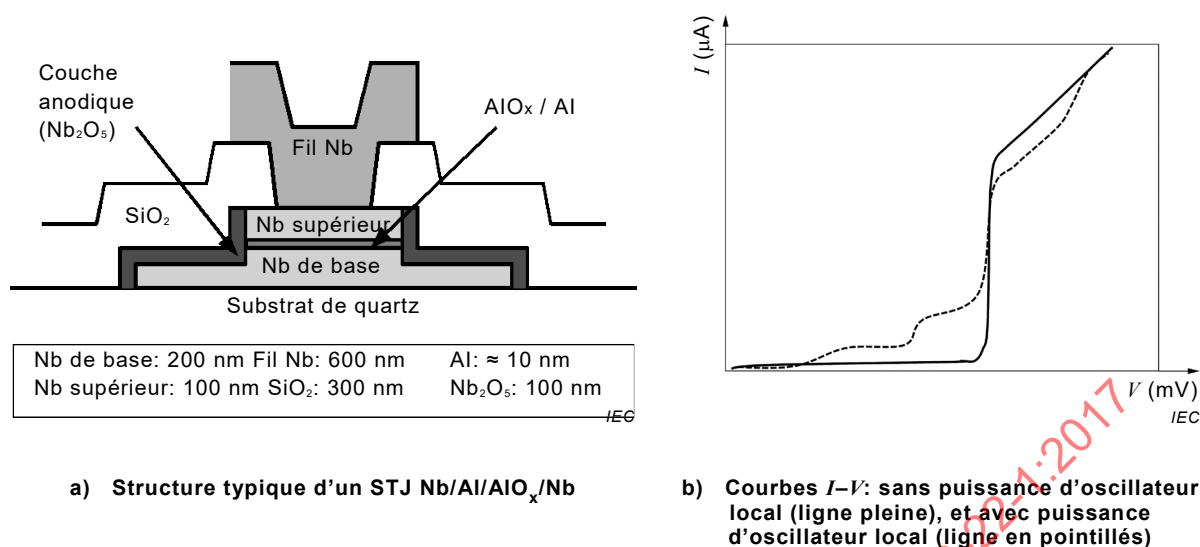
Figure A.1 – Mélangeur SHEB

Un exemple de type SHEB est un dispositif qui consiste en deux plaques métalliques épaisses connectées ou reliées par un petit micropont supraconducteur de NbN ayant une épaisseur de 3,5 nm, une largeur de 400 nm et une longueur de 4 μm (voir les Figures A.1 a) et A.1 b)). Nb, NbTiN, Al, et $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ sont d'autres exemples de matériaux.

Un avantage du type SHEB est qu'il fonctionne à des vitesses très élevées au travers un refroidissement par diffusion à électron ou à phonon rapide, ce qui permet la détection hétérodyne du rayonnement à une fréquence supérieure à environ 1 000 GHz que les mélangeurs STJ ne peuvent pas recevoir efficacement du fait de l'excitation des quasi-particules au-delà d'un paramètre de bande interdite. Les SHEB peuvent également être utilisés pour la détection directe, mais leur principale application est la détection hétérodyne.

A.2 Type jonction supraconductrice à effet tunnel (STJ)

La structure STJ est exactement la même que celle des jonctions à effet tunnel Josephson (Figure A.2 a)), mais l'effet Josephson nécessite d'être supprimé par un champ magnétique appliqué en parallèle à la surface de jonction. Le type STJ permet la détection cohérente fondée sur le mélange hétérodyne du mesurande des ondes électromagnétiques en millimètres et des bandes d'ondes sous-millimétriques et d'une fréquence d'un oscillateur local, afin de convertir les fréquences dans la bande à hyperfréquences en utilisant des courbes fortes non linéaires $I-V$ (Figure A.2 b)). Les mélangeurs STJ sont couramment appelés mélangeurs supraconducteur isolateur supraconducteur (SIS) du fait de leur structure sandwich. Les mélangeurs SIS fonctionnant à une température cryogénique (par exemple 4 K) sont indispensables pour les fréquences inférieures à environ 1 000 GHz, pour lesquelles il n'existe pas d'amplificateur à bruit faible. Aux fréquences converties qui se trouvent généralement dans la bande de fréquence à hyperfréquences, les amplificateurs fondés sur un semiconducteur à bruit faible sont disponibles.



Un exemple de STJ est une jonction Nb/Al/AIO_x/Nb, présentée à la Figure A.2 b). La taille et la densité de courant critique diminuent et augmentent, respectivement, avec l'augmentation de la fréquence du signal afin de maintenir constante la résistance normale. La taille et la densité de courant critique typiques d'une jonction à 500 GHz (0,6 mm de longueur d'onde) sont approximativement 1 μm et $100 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ à 4,2 K, respectivement.

Un avantage des mélangeurs STJ est la résolution spectrale très élevée comparée à la détection directe de photons, bien que leur sensibilité les désavantage.

A.3 Type interféromètre quantique supraconducteur (SQUID)

Le type SQUID permet la détection cohérente de l'état quantique d'une boucle supraconductrice contenant une jonction Josephson (RF SQUID) ou deux jonctions Josephson (DC SQUID, Figure A.3), fondée sur la quantification du flux magnétique et de l'effet Josephson. L'état cohérent est influencé par le flux magnétique couplé à la boucle SQUID. Grâce à ce couplage de flux, tout mesurande qui peut être transformé en flux magnétique traversant la boucle SQUID peut être mesuré par un capteur SQUID. Les magnétomètres ou capteurs de courant SQUID extrêmement sensibles en sont des exemples notables. De plus, la susceptibilité magnétique et le moment magnétique des matériaux peuvent également être mesurés avec des capteurs SQUID. Les courants écrans ou la pénétration des quanta du flux magnétique ($\Phi_0 = 2,0678 \times 10^{-15} \text{ Wb}$) dans la boucle SQUID supraconductrice résultent en des oscillations périodiques de la tension par rapport au flux magnétique ou de la tension par rapport aux caractéristiques du flux magnétique des SQUID. La période de ces oscillations est un quantum de flux Φ_0 . Les capteurs SQUID peuvent cependant avoir des sensibilités meilleures qu'un Φ_0 et peuvent être utilisés avec ou sans circuit de rétroaction en tant que détecteur nul de flux magnétique.

Un SQUID à faible T_c constitué d'alliage à base de niobium fonctionne typiquement à 4,2 K (par exemple dans l'hélium liquide) et un SQUID à T_c élevée fonctionne à 77 K (dans l'azote liquide). Les principes de fonctionnement des SQUID sont fondamentalement identiques, mais leur sensibilité est différente. Le niveau de bruit du SQUID à faible T_c est de l'ordre de 1 fT/Hz^{1/2} et celui du SQUID à T_c élevée est 10 fois plus important.

La Figure A.3 a) est une illustration schématique d'un magnétomètre typique qui utilise un DC SQUID. Un transformateur de flux qui consiste en une grande bobine de détection et une bobine d'entrée en spirale est utilisé. Un champ magnétique externe est transformé en flux magnétique par le transformateur en traversant la boucle SQUID. Une tension périodique Φ_0 par rapport à une réponse de flux magnétique est obtenue (Figure A.3 b)).