

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Superconductivity –

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

Supraconductivité –

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



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2022 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 Secretariat
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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.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.

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Discover our powerful search engine and read freely all the publications previews. With a subscription you will always have access to up to date content tailored to your needs.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 300 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 19 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

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.

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Découvrez notre puissant moteur de recherche et consultez gratuitement tous les aperçus des publications. Avec un abonnement, vous aurez toujours accès à un contenu à jour adapté à vos besoins.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 300 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 19 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Superconductivity –

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

Supraconductivité –

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

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.050

ISBN 978-2-8322-4070-0

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

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	8
2 Normative references	8
3 Terms, definitions and abbreviated terms	8
3.1 Terms and definitions.....	8
3.2 Abbreviated terms.....	10
4 Principle of the measurement method.....	10
5 Apparatus.....	11
5.1 Detector packaging	11
5.2 Cryogenic system	11
5.3 Measurement system.....	13
6 Measurement procedure	14
6.1 Measurement of temperature	14
6.2 Measurement of switching current.....	14
6.3 Measurement of R_D	15
7 Standard uncertainty	16
7.1 Type A uncertainty.....	16
7.2 Type B uncertainty.....	16
7.3 Uncertainty budget table	17
7.4 Uncertainty requirement.....	18
8 Test report.....	18
8.1 Identification of device under test (DUT)	18
8.2 Measurement conditions and results	18
8.3 Miscellaneous optional report	19
Annex A (informative) Results of the round robin test.....	20
A.1 DUT packages	20
A.2 Measurement conditions	20
A.3 Measurement results.....	21
Bibliography.....	25
Figure 1 – Example of one dark count pulse in the pulse train in inset	9
Figure 2 – Schematic curve of R_D as a function of normalized bias current.....	11
Figure 3 – Schematic diagram of a typical <i>DCR</i> measurement system.....	12
Figure 4 – Equivalent circuit of the <i>DCR</i> measurement.....	13
Figure 5 – Typical current-voltage (<i>I-U</i>) curve of an SSPD.....	15
Figure A.1 – Photograph of the DUT with an SSPD and a temperature sensor	20
Figure A.2 – <i>I-U</i> curve and R_D curves	22
Table 1 – Uncertainty budget table for R_D	18
Table A.1 – Test data of DUT.....	22
Table A.2 – Temperature sensitivity and bias current sensitivity above a normalized bias current of 0,9.....	23

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-22-3:2022

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

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

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

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

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

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

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

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

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

A list of all parts in the IEC 61788 series, published under the general title *Superconductivity*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this document will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under webstore.iec.ch in the data related to the specific document. At this date, the document will be

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

IMPORTANT – The "colour inside" logo on the cover page of this document indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-22-3:2022

INTRODUCTION

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

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

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

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

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

¹ Figures in square brackets refer to the Bibliography.

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-22-3:2022

SUPERCONDUCTIVITY –

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

1 Scope

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

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

2 Normative references

There are no normative references in this document.

3 Terms, definitions and abbreviated terms

3.1 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions 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>

3.1.1

dark count

count recorded without any incident photon

Note 1 to entry: An example of one dark count is shown in Figure 1. The inset of Figure 1 shows a pulse train of many dark counts, which have the same pulse shape.

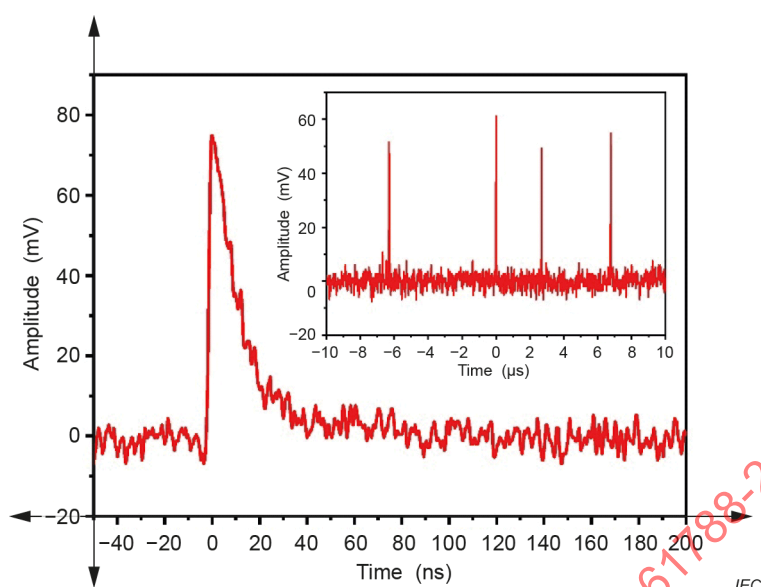


Figure 1 – Example of one dark count pulse in the pulse train in inset

3.1.2

dark count rate

DCR

R_D

number of dark counts per unit of time

Note 1 to entry: R_D is equal to the sum of R_{Db} and R_{Di} as defined below.

3.1.3

background dark count rate

R_{Db}

DCR originating from blackbody radiation of optical components and stray photons

3.1.4

intrinsic dark count rate

R_{Di}

DCR originating from spontaneous occurrence of resistance inside a superconductor strip

3.1.5

bias current

I_b

direct current flowing through a superconductor strip that forms an SSPD to hold operating condition

3.1.6

switch current

I_{sw}

maximum bias current for photon counting operation

Note 1 to entry: The I_{sw} value can be determined as the highest supercurrent on a static current-voltage (I - U) curve. Since a strip goes to normal conducting state locally by electrothermal feedback mechanism, the I_{sw} value is usually lower than the critical current, at which the whole strip becomes the normal conducting state.

3.1.7**normalized bias current**

$$I_b/I_{sw}$$

bias current divided by switch current

3.1.8**retrapping current**

$$I_r$$

current at which an SSPD resumes a superconducting state from a normal conducting state when the bias current is reduced from a high value above I_{sw}

3.2 Abbreviated terms

R_D dark count rate

R_{Db} background dark count rate

R_{Di} intrinsic dark count rate

I_b bias current

I_{sw} switch current

T temperature

t time interval

I_r retrapping current

V_{pp} output pulse amplitude

N number of measurements at a specific I_b and T

u_A type A standard uncertainty of R_D

u_B type B standard uncertainty of R_D

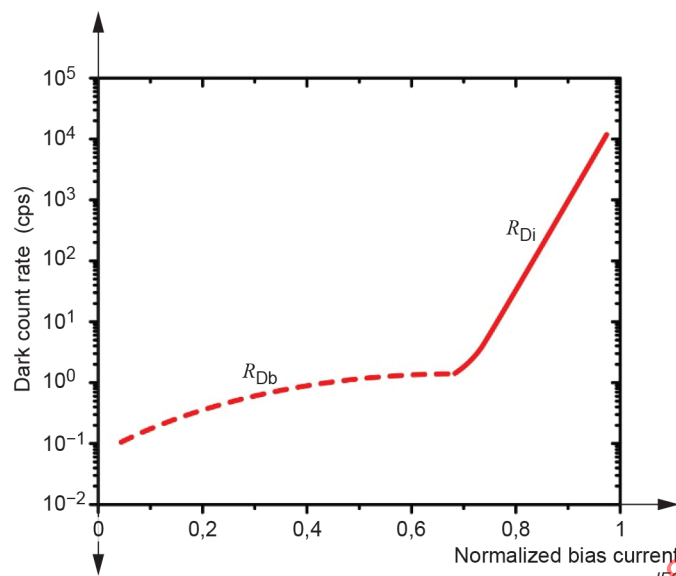
4 Principle of the measurement method

DCR is divided into two components: background DCR (R_{Db}) that originates from blackbody radiation of optical components and stray photons at any I_b value and intrinsic DCR (R_{Di}) that originates from spontaneous occurrence of resistance inside superconductor strips and is dominant in a high I_b region near I_{sw} .

Figure 2 shows a schematic curve of the bias current dependence of R_D , which is called the R_D curve. In the measurement setup with an SSPD coupled to an optical fibre for signal input, the R_{Db} component is dominant in a low I_b region, while the R_{Di} component is dominant in a high I_b region. The R_{Db} component that has a relatively weak dependence on I_b and equals the product of the detection efficiency and the sum of blackbody photons and stray photons. On the other hand, the R_{Di} component is related to the events of spontaneous voltage-drop occurrence probably due to vortex dynamics related to inherent properties of superconductor strips.

Since R_{Db} strongly depends on user's environment, R_D curves shall be measured in a high bias current region of $I_b/I_{sw} (> 0,8$ in Figure 2), in which R_{Di} is dominant with a negligible contribution of R_{Db} .

The R_D curves shall be measured by counting output pulses for a certain period at different I_b points while the temperature of the SSPD is held constant at an operating temperature recommended by a manufacturer. There is an approximately linear relation between $\lg(R_D)$ and normalized bias current in $I_b/I_{sw} > 0,8$, as shown in Figure 2.



R_{Db} is dominant in the low bias region.

R_{Di} is dominant in the high bias region.

Figure 2 – Schematic curve of R_D as a function of normalized bias current

5 Apparatus

5.1 Detector packaging

Before characterizing an SSPD, it is necessary to make a detector package. For applications, the most important purpose of packaging is to effectively couple the light to the SSPD active area. A high coupling efficiency ensures a high detection efficiency. However, for the measurement of R_{Di} of the SSPD, optical coupling is optional.

When optical coupling is optionally installed, fibre optical coupling is one of the most common methods. The optical fibre shall be fixed in the block with effective and stable light coupling to the detector. The temperature of the fibre end shall be the same as the block to minimize R_{Db} . The fibre core shall be axially aligned to the SSPD active area surface to ensure good optical coupling.

For the measurement of R_{Di} , the SSPD shall be fixed to the packaging block using conductive silver paste or low-temperature conducting epoxy to ensure good thermal contact. The SSPD shall be surrounded by the block material so that no blackbody radiation causes a temperature rise of the SSPD. The block should be made of oxygen-free copper and equipped with a radio frequency (RF) connector.

5.2 Cryogenic system

The most commonly used cryogenic system for SSPD operation is a cryostat based on a closed-cycle mechanical cryocooler, e.g., Gifford-McMahon (GM) cryocooler or a pulse-tube cryocooler, which provides a base temperature of less than 4 K. The packaging block is mounted on a cold head plate with good thermal contact to obtain the identical temperature as that of the plate. It is noted that a geomagnetic field causes no observable change in DCR , so that a magnetic shield is unnecessary.

The temperature of the packaging block shall be measured by a calibrated temperature sensor during the R_D measurement. The procedure of the temperature measurement is provided in 6.1.

The fibre and coaxial cables should be installed inside the cryostat to provide the optical and electronic connection between the detector package and the measurement circuit at room temperature.

As shown in Figure 3, one end of the fibre (blue line) is fixed on the detector package. The other end of the fibre is connected to a fibre connector (blue square) on the cryostat chamber surface at room temperature. For the measurement of R_{Di} , the fibre should be removed, then the detector is fully shielded from blackbody radiation and stray photons.

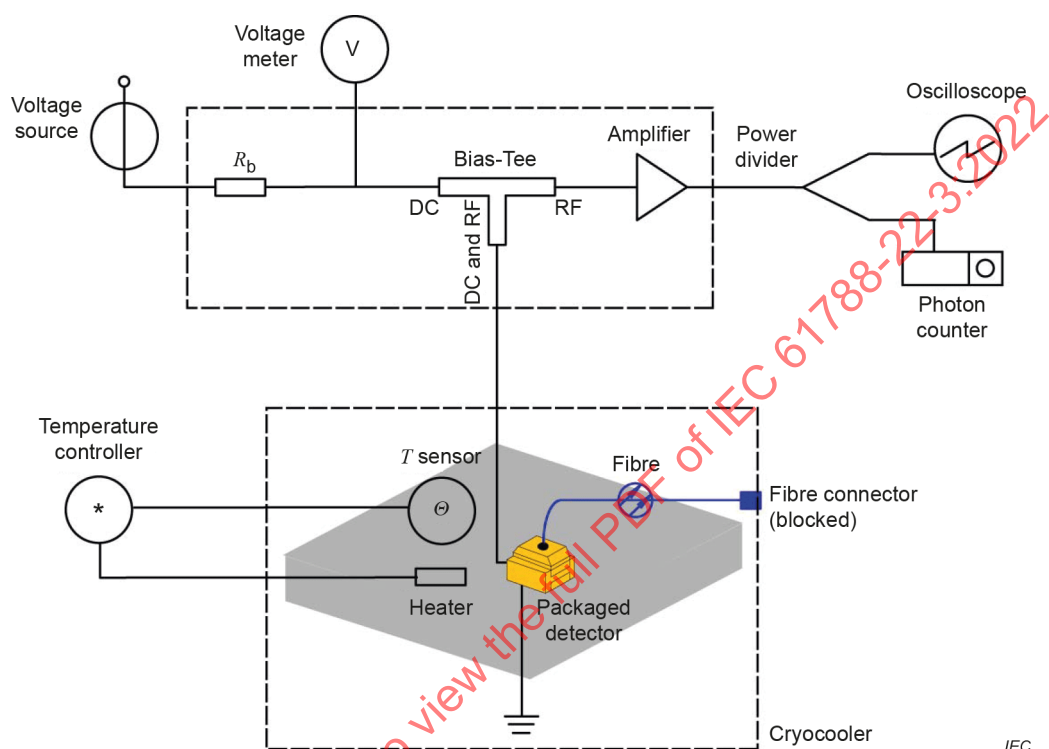


Figure 3 – Schematic diagram of a typical *DCR* measurement system

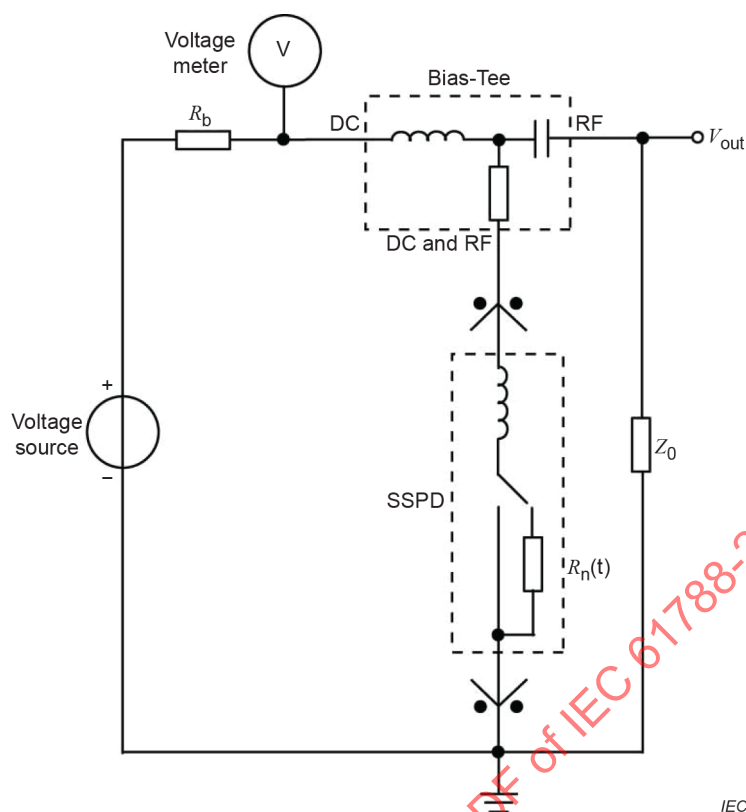


Figure 4 – Equivalent circuit of the *DCR* measurement

5.3 Measurement system

The schematic diagram of a typical measurement system for the *DCR* measurement and the equivalent circuit are shown in Figure 3 and Figure 4, respectively. The SSPD in the detector package is connected to the bias tee through a coaxial cable. The voltage source in series with the bias resistor (R_b) supplies a stable bias current to the SSPD. The tolerance of the bias resistor shall be better than $\pm 0,01\%$ (the $\pm$ sign here means the upper and lower tolerance limits, which is different from the expanded uncertainty). The bias current is fed to the detector through the direct current (DC) port of the bias tee, and output pulses are extracted from the RF port and then amplified by a wideband low noise RF amplifier. The amplifier shall cover 100 kHz to 500 MHz at least to avoid pulse waveform distortion. The amplifier input impedance shall be $50\ \Omega$ to achieve a return loss over 15 dB to reduce back-reflected pulses. The amplified pulses should be monitored by an oscilloscope, and shall be counted by a counting instrument.

A better signal-to-noise ratio can be obtained when a suitable bias tee and an amplifier are operated at a low temperature. However, the cryogenic operation is optional, since no change in *DCR* is expected by adjusting a threshold value for counting output pulses properly.

In order to reduce or eliminate environmental electromagnetic noise, all the electronics in the measurement system are shielded by a metallic shell, which also should be connected to the earth terminal. To avoid the potential difference among the circuit components, stabilize phase voltage with reference to the earth and limit transient voltage; the resistance to the earth should be less than $4\ \Omega$. The length of the earth wire from the instruments to the earth should be less than 2 m.

6 Measurement procedure

6.1 Measurement of temperature

A cryogenic temperature sensor, e.g. Si diode, with a calibrated accuracy of ± 12 mK in a working temperature range shall be used to monitor T and its fluctuation of the detector package, which shall be firmly attached to the package block or as close to the block as possible. The operating temperature shall be kept constant by using a temperature controller with a heater attached to the cold head.

Because DCR is sensitive to temperature, it is necessary to measure its fluctuation during the DCR measurement. The fluctuation is defined as the highest and lowest temperatures subtracted by an average temperature.

Typically, the short-term temperature fluctuation of the cryocooler cold head can be kept below 12 mK. However, long-term fluctuation can be influenced by the environmental temperature. Therefore, during the DCR measurements, T values should be recorded periodically more than ten times.

The average temperature value during the R_D measurement shall be reported as stated in Clause 8. The required temperature regulation is $\pm 0,5$ % of an average temperature during measurement. DCR measurements at different operating temperatures may be reported for a wide range of applications.

6.2 Measurement of switching current

The switch current (I_{sw}) shall be measured before R_D measurement. The detector package shall be cooled in a cryostat with a mechanical cooler or a liquid cryogen to a base temperature, which shall be regulated. When the reading value of the temperature controller reaches the operating temperature, an interval of more than 10 minutes should be required before starting I - U curve measurement. The I - U curve measurement should be carried out using the DC channel in Figure 3, where the voltage source is connected to R_b and the detector in series. Figure 5 shows a typical I - U curve.

Two-terminal I - U measurement instead of four-terminal measurement may be used owing to the high resistance of the SSPD in a normal conducting state. The procedure for the I - U curve measurement should be as follows.

- a) The voltage of a voltage source should be scanned up and down gradually so that a static I - U curve is obtained.
- b) The DC voltage drop across the SSPD (U_{SSPD}) should be measured by a voltmeter.

The current flowing in the detector can be calculated from U_{source} , R_b and U_{SSPD} by using

$$I_{SSPD} = I_{R_b} = \frac{U_{source} - U_{SSPD}}{R_b}. \text{ The scan loop reaches the highest current at } I_{sw}. \text{ Beyond this}$$

point, the I_{SSPD} decreases along the load line. After a part of the strip becomes normal conducting, U_{SSPD} increases further. When the voltage is reduced from the maximum voltage, the SSPD returns to a zero-voltage state at I_r .

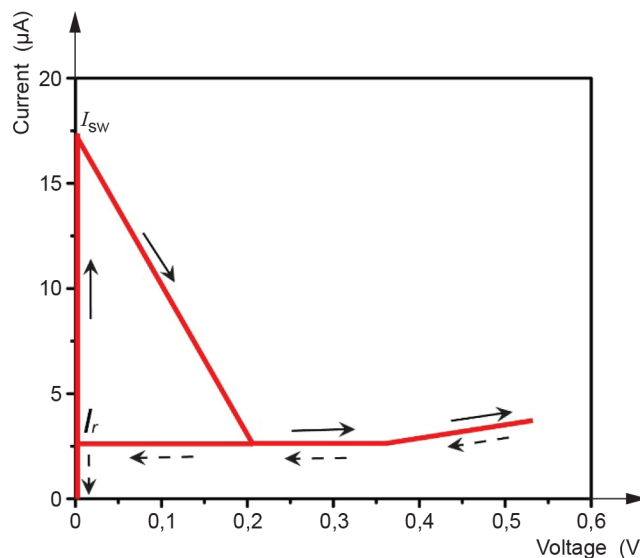


Figure 5 – Typical current-voltage (I - U) curve of an SSPD

6.3 Measurement of R_D

The DCR measurement procedure shall be as follows.

- The temperature of the detector package shall be set at a proper operating temperature recommended for the use of the SSPD.
- The temperature fluctuation during the DCR measurement shall be regulated within $\pm 0,5$ % of an average temperature.
- The discrimination voltage of the photon counting shall be set at a value between $0,5 V_{pp}$ and $0,9 V_{pp}$, where V_{pp} is the amplitude of the detector output pulses. The V_{pp} is equal to $50 \Omega (I_b - I_r) G$, where G is the gain of the amplifier.
- The pulse counter records the number of dark counts generated in a time interval (t). The time interval of the counter shall be set at a value, for example 10 s, so that the type A relative standard uncertainty of u_A / R_D is less than 14 % that is given in 7.4. R_D is obtained by dividing the count number by t .
- R_D at each specific I_b point shall be recorded N times. Average values of $\overline{R_D}$ shall be calculated using Formula (1). N shall be more than 10.

$$\overline{R_D} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N R_{Dj} \quad (1)$$

- An R_D curve shall be measured by increasing I_b at a certain small step in a range between $0,9 \times I_{sw}$ and I_{sw} so that the number of data points is more than 5. The procedure described in d) to e) shall be repeated until I_b reaches just below I_{sw} .
- The dependence of R_D curves on temperature may optionally be measured by changing the operating temperature. The procedure described in d) to f) shall be repeated when the temperature dependence is measured.

7 Standard uncertainty

7.1 Type A uncertainty

The type A uncertainty of R_D , which is the measurement uncertainty based on statistical analysis, is evaluated by measuring R_D N times at each normalized bias point I_b/I_{sw} [5] [6].

The standard uncertainty u_A that is the standard deviation of the average DCR shall be calculated by Formula (2) at each I_b point.

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (R_{Dj} - \overline{R_D})^2} \quad (2)$$

The u_A value at a normalized bias current of 0,955, which is the second highest value in Table A.3, is used for making the budget table of Table 1 and evaluating the standard uncertainty of this measurement method. The normalized bias point 0,955 is suitable for this u_A evaluation, since the $\overline{R_D}$ value at that bias point is large enough for statistical analysis and moreover both sensitivities of R_D to temperature and current are calculable in 7.2 (Type B uncertainty).

The maximum relative standard uncertainty of u_A/R_D shall be kept less than 14 % at any bias point, as required in 7.4.

7.2 Type B uncertainty

The type B uncertainty of R_D , which is the evaluation of uncertainty by methods other than statistical analysis, includes uncertainty arising from fluctuation in the temperature measurement and the voltage source for the current bias [5] [6]. The uniform probability density function is assumed for calculating the standard deviation of temperature u_T and current u_{I_b} . The u_B is expressed by Formula (3),

$$u_B = \sqrt{\left(\frac{\partial R_D}{\partial T}\right)^2 \times u_T^2 + \left(\frac{\partial R_D}{\partial I_b}\right)^2 \times u_{I_b}^2} \quad (3)$$

where $\partial R_D / \partial T$ is the sensitivity of R_D to a variation of temperature T , $\partial R_D / \partial I_b$ is the sensitivity of R_D to a variation of bias current I_b ; u_T and u_{I_b} are the standard deviation values of temperature and current, respectively.

The $\partial R_D / \partial T$ and $\partial R_D / \partial I_b$ values are calculated at each point in a range of over $I_b / I_{sw} = 0,9$ for the data in Annex A, as an example. The temperature sensitivity is evaluated by using an expression of $[R_D(2,26 \text{ K}) - R_D(2,34 \text{ K})] / 0,08 \text{ K}$, which is 195 098,8 cps/K at $I_b / I_{sw} = 0,955$. The current sensitivity expressed by $[R_D(5,20 \text{ } \mu\text{A}) - R_D(5,30 \text{ } \mu\text{A})] / 0,1 \text{ } \mu\text{A}$ is 73 791,0 cps/ μA at 5,25 μA ($I_b / I_{sw} = 0,955$) at an operating temperature of 2,300 K. Since $\partial R_D / \partial I_b$ at 5,30 μA is unobtainable, the data at 5,25 μA are used to complete Table 1. Table A.2 shows that the relative sensitivity values of $\left(\frac{\partial R_D}{\partial T}\right) / \overline{R_D}$ ($\approx 30 \%$ to 36%) and $\left(\frac{\partial R_D}{\partial I_b}\right) / \overline{R_D}$ ($\approx 13 \%$ to 14%) are almost independent of T and I_b , so that the relative type B uncertainty is also almost independent of T and I_b . The calculation using the data at 5,25 μA is statistically more accurate than those at lower bias points, since the $\overline{R_D}$ value is highest except one at 5,30 μA . Therefore, the uncertainty calculation using the data at 5,25 A is acceptable.

The u_T value is evaluated by a standard deviation originating from the precision of the temperature sensors and the random temperature fluctuations of the cryogenic system. A Si diode temperature sensor has a calibrated accuracy of $\pm 12 \text{ mK}$ in a working temperature range of 1,4 K to 10,0 K. It is assumed that temperature sensors have a uniform probability density function of $\pm 12 \text{ mK}$ that means the upper and lower tolerance limits of temperature calibration. The standard deviation of temperature sensor is $24 \text{ mK} / 2 / \sqrt{3} \approx 6,9 \text{ mK}$. The required temperature regulation in 7.4 is $\pm 0,5 \%$ of an average temperature during measurement. At 2,3 K in the measurement of Annex A, it is $\pm 11,5 \text{ mK}$ and the standard deviation is $23 \text{ mK} / 2 / \sqrt{3} \approx 6,6 \text{ mK}$. The measured random fluctuation of temperature in the measurement of Annex A is around $\pm 5 \text{ mK}$, which is well below the requirement. Therefore, the standard deviation of temperature in this document is $u_T = \sqrt{(6,9 \text{ mK})^2 + (6,6 \text{ mK})^2} \approx 9,5 \text{ mK}$.

The u_{I_b} value is evaluated by the standard deviation originating from the typical precision of voltage sources and the tolerance of the bias resistor. The root mean square of noise of the voltage source used in Annex A is 10 μV , so the standard deviation of 10 μV is maximum at zero output voltage. At a higher output voltage, it becomes smaller. The maximum value is used for the budget table. Taking the resistance of the standard bias resistor as 20 k Ω with a tolerance of $\pm 0,01 \%$ (the $\pm$ sign here means the upper and lower tolerance limits, which is different from the expanded uncertainty), the standard deviation is $20 \text{ k}\Omega \times 0,000 1 / \sqrt{3} \approx 1,15 \Omega$ in a uniform probability density function. The variance of U/R_b at 0,106 V ($I_b = 5,25 \text{ } \mu\text{A}$) in Figure A.2 is $u^2\left(\frac{U}{R_b}\right) = (10 \text{ } \mu\text{V} / 20 \text{ k}\Omega)^2 + (0,106 \text{ V} / (20 \text{ k}\Omega)^2 \times 1,15 \Omega)^2 \approx 3,43 \times 10^{-7} (\mu\text{A})^2$.

Therefore, the u_{I_b} of $5,9 \times 10^{-4} \text{ } \mu\text{A}$ is used for the evaluation in 7.3.

7.3 Uncertainty budget table

The typical estimation of the standard uncertainty in this document is summarized in Table 1. The total standard uncertainty value of u_{total} at a specific I_b value of 5,25 μA ($I_b / I_{sw} = 0,955$) is calculated by summing the type A uncertainty u_A and the type B uncertainty u_B according to the propagation law. The u_{total} value at 5,25 μA represents the total standard uncertainty of this document as described in 7.1 and 7.2.

Table 1 – Uncertainty budget table for R_D

Factor	Parameter symbol	Symbol of standard deviation and type	Sensitivity coefficient	Standard deviation of parameter	Contribution to u_{total}
N times measurement	R_D	u_A , A	–	148,1 cps	148,1 cps
Temperature	T	u_T , B	195 098,8 cps/K	9,5 mK	1 853,4 cps
Current	I	u_I , B	73 791,0 cps/μA	$5,9 \times 10^{-4}$ μA	43,5 cps
Combined standard uncertainty		u_{total}	1 859,8 cps		
Relative standard uncertainty		34,4 %			
$R_D \pm$ expanded uncertainty (coverage factor $k = 2$)		5 414,0 $\pm$ 3 719,6 cps			

7.4 Uncertainty requirement

The temperature during the DCR measurement shall be regulated within the upper and lower limits of $\pm 0,5$ % of an average temperature.

As shown in the uncertainty budget in Table A.1, the contribution to the total uncertainty u_{total} is dominated by the temperature uncertainty. Therefore, in order not to significantly exceed the level of the standard uncertainty in Table 1, the value of u_A , which is the standard deviation value of the multiple measurement of R_D , at the highest bias current should be less than $5 \times u_A$ in Table 1. Correspondingly, the relative standard uncertainty of $u_A / R_D (= 5 \times 148,1 / 5 414,0)$ shall be less than 14 %. When u_A / R_D at the highest bias current exceeds this value, the measurement apparatus shall be improved to meet this requirement.

8 Test report

8.1 Identification of device under test (DUT)

The DUT shall be identified as follows:

- name of the manufacturer of the DUT;
- DUT serial number or equivalent identification;
- superconductor material and substrate;
- structure of the SSPD;
- fibre coupling method.

8.2 Measurement conditions and results

The measurement conditions and results shall be recorded as follows:

- I_{sw} value;
- R_D curve(s) as a function of normalized bias current;
- relative standard uncertainty (u_A / R_D) of R_D at the highest I_b point;
- average temperature;
- standard deviation of temperatures during the R_D measurement;

- the fluctuation of the temperature of an average temperature during the R_D measurement (the required temperature regulation is $\pm 0,5 \%$).

8.3 Miscellaneous optional report

The following data may be reported optionally:

- R_D curve(s) as a function of normalized bias current at different operating temperatures;
- $I-U$ curve at operating temperature;
- specification of the temperature sensor: model, temperature range, calibration accuracy;
- fibre connection structure inside the cryostat: connector, mechanical slice, or fusion slice;
- detector mount method in the cryostat
- method avoiding stray photons;
- configuration of the electric measurement system.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-22-3:2022

Annex A (informative)

Results of the round robin test

A.1 DUT packages

The SSPDs were fabricated in Shanghai and packaged in copper blocks. A temperature sensor was rigidly mounted on the package, in order to avoid the inconsistency of the test results during round robin tests. The DUT is shown in Figure A.1.

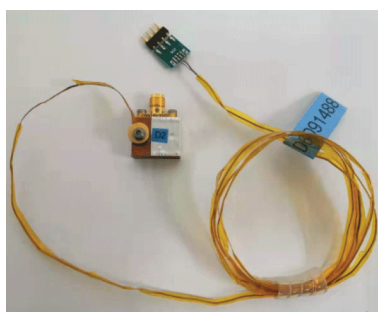
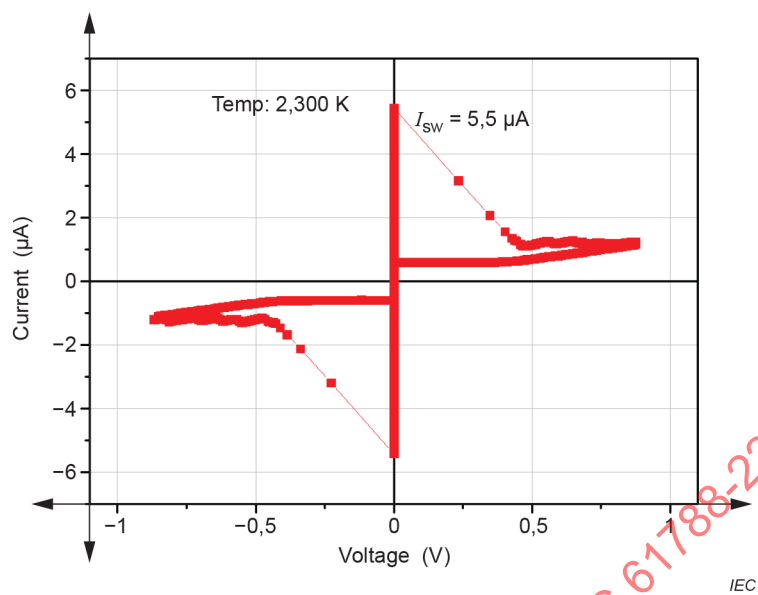


Figure A.1 – Photograph of the DUT with an SSPD and a temperature sensor

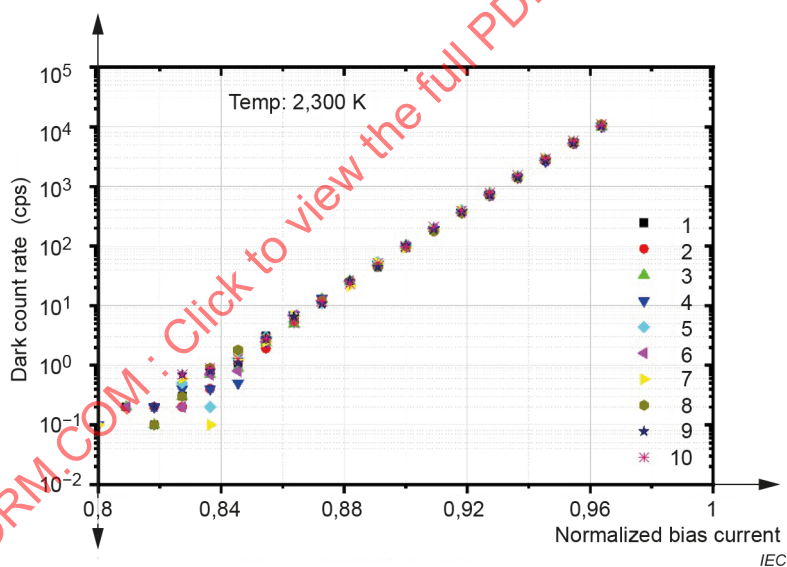
A.2 Measurement conditions

- Temperature: the temperature was set at 2,300 K by using a temperature sensor and a controller for testing.
- Measurement system: the schematic diagram of the measurement system is shown in Figure 3.
- Counting events: the discrimination voltage level was set at $0,7 V_{pp}$ at each bias current. The *DCR* measurement time was fixed at 10 s at each I_b point. The step of the bias current increment was fixed at $0,05 \mu A$.

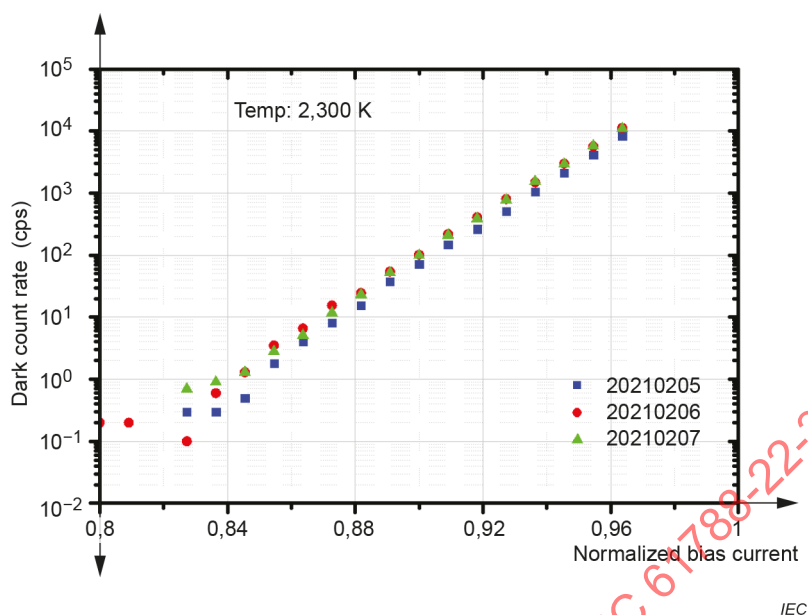
A.3 Measurement results



(a) I - U curve



(b) R_D curves tested 10 times in one day



(c) R_D curves tested on three consecutive days dates

Figure A.2 – I - U curve and R_D curves

The data of measurement results are based on measurements of one institute (SIMIT) only.

The I - U curve was measured according to the procedure in 6.2, which is shown in Figure A.2a). The I_{sw} is 5,5 μ A extracted from the I - U curve.

The R_D was measured 10 times in one day from 0,800 I_{sw} to 0,964 I_{sw} according to the procedure in 6.3, which is shown in Figure A.2 b). The same measurement of R_D was repeated in three consecutive days, which is shown in Figure A.2 c).

Table A.1 – Test data of DUT

Date	05,06,07/02/2021	
Temperature (K)	Min.	Max.
	2,296	2,304
I_{sw} (μ A)	5,5	
I_b (μ A)	Min.	Max.
	4,4	5,3

The test data of DUT is shown in Table A.1. The temperature was controlled to be 2,296 K to 2,304 K. Since the I_{sw} is 5,5 μ A, the I_b range for the R_D measurement is 4,4 μ A to 5,3 μ A (0,800 I_{sw} to 0,964 I_{sw}).

Table A.2 – Temperature sensitivity and bias current sensitivity above a normalized bias current of 0,9

Bias current [μA]	Normalized bias	$\overline{R_D}$ [cps]	$\frac{\partial R_D}{\partial T}$ [cps/K]	$\left(\frac{\partial R_D}{\partial T}\right) / \overline{R_D}$ [1/K]	$\frac{\partial R_D}{\partial I_b}$ [cps/μA]	$\left(\frac{\partial R_D}{\partial I_b}\right) / \overline{R_D}$ [1/μA]
4,90	0,891	49,0	1 557,5	31,8	696,0	14,2
4,95	0,900	98,6	2 918,8	29,6	1 273,0	12,9
5,00	0,909	191,6	6 073,8	31,7	2 612,0	13,6
5,05	0,918	377,2	11 727,5	31,1	5 433,0	14,4
5,10	0,927	729,6	23 092,5	31,7	10 154,0	13,9
5,15	0,936	1 433,3	45 337,5	31,6	19 438,0	13,6
5,20	0,945	2 783,5	91 961,3	33,0	38 130,0	13,7
5,25	0,955	5 414,0	195 098,8	36,0	73 791,0	13,6
5,30	0,964	10 347,1	/	/	/	/

Table A.3 – u_A and u_B above a normalized bias current of 0,9

Bias current [μA]	Normalized bias	$\overline{R_D}$ [cps]	u_A [cps]	$u_A / \overline{R_D}$ [%]	u_T, B [cps]	u_I, B [cps]	u_{total} [cps]	$u_{total} / \overline{R_D}$ [%]
4,90	0,891	49,0	3,0	6,1	10,7	0,3	11,1	22,7
4,95	0,900	98,6	3,6	3,6	20,1	0,5	20,5	20,8
5,00	0,909	191,6	9,3	4,9	41,9	1,1	43,1	22,5
5,05	0,918	377,2	14,4	3,8	80,9	2,3	82,3	21,8
5,10	0,927	729,6	21,8	3,0	159,3	4,3	161,0	22,1
5,15	0,936	1 433,3	45,4	3,2	312,8	8,2	316,5	22,1
5,20	0,945	2 783,5	91,7	3,3	634,5	16,0	642,0	23,1
5,25	0,955	5 414,0	148,1	2,7	1 346,2	31,0	1 355,6	25,0
5,30	0,964	10 347,1	335,1	3,2	/	/	/	/

We calculated the temperature sensitivity and bias current sensitivity using the data in Figure A.2 b), and u_A and u_B above a normalized bias current of 0,9, which is shown in Table A.2 and Table A.3, respectively.

Table A.4 – Budget table for R_D at a bias point of 5,25 μA ($I_b/I_{sw} = 0,955$)

Factor	Parameter symbol	Symbol of standard deviation and type	Sensitivity coefficient	Standard deviation of parameter	Contribution to u_{total}
N times measurement	R_D	u_A , A	–	148,1 cps	148,1 cps
Temperature	T	u_T , B	195 098,8 cps/K	9,5 mK	1 853,4cps
Current	I	u_I , B	73 791,0 cps/μA	$5,9 \times 10^{-4}$ μA	43,5 cps
Combined standard uncertainty		u_{total}	1 859,8 cps		
Relative standard uncertainty		34,4 %			
$R_D \pm$ expanded uncertainty (coverage factor $k = 2$)		5 414,0 $\pm$ 3 719,6 cps			

Table A.5 – DCR values measured at a bias point of 5,25 μA ($I_b/I_{sw} = 0,955$)

Bias point [μA]	DCR_1	DCR_2	DCR_3	DCR_4	DCR_5	DCR_6	DCR_7	DCR_8	DCR_9	DCR_{10}
5,25	10 077,1	10 042,2	9 990,2	10 188,8	10 627,1	10 097,7	10 335,6	10 954	10 272,1	10 885,8

According to the data in Table A.2 and Table A.3, the budget table for R_D was made at a bias point of 5,25 μA ($I_b/I_{sw} = 0,955$), shown in Table A.4. The specific data of R_D at 5,25 μA tested 10 times are shown in Table A.5.

Table A.6 – Temperature measurement

Average temperature K	fluctuation of temperature K	Relative fluctuation of temperature (fluctuation divided by average temperature) %
2,300	$\pm 0,005$	0,2

The temperature was controlled to 2,300 K with a temperature sensor and controller. The temperatures were recorded 9 times per second at the period of R_D measurement. The statistical data is summarized in Table A.6.

Bibliography

- [1] IEC 61788-22-1, *Superconductivity – Part 22-1: Superconducting electronic devices – Generic specification for sensors and detectors*
- [2] ISO TS 80004-2:2015, *Nanotechnologies – Vocabulary – Part 2: Nano-objects*
- [3] GOL'TSMAN, G. N., et al. *Picosecond superconducting single-photon optical detector. Applied Physics Letters*. 2001, 79(6), 705-707. Available at <https://doi.org/10.1063/1.1388868>
- [4] SEMENOV, A. D., "Superconducting nanostrip single-photon detectors: some fundamental aspects in detection mechanism, technology and performance," *Superconductor Science and Technology*. 2021, 34(5), 054002. Available at: <https://doi.org/10.1088/1361-6668/abef7d>
- [5] ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement* (GUM:1995). Available at <https://webstore.iec.ch/publication/11961>
- [6] JCGM 102:2011, *Evaluation of measurement data – Supplement 2 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" – Extension to any number of output quantities*. Available at https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_102_2011_E.pdf/6a3281aa-1397-d703-d7a1-a8d58c9bf2a5

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-22-3:2022

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	28
INTRODUCTION.....	30
1 Domaine d'application	32
2 Références normatives	32
3 Termes, définitions et termes abrégés	32
3.1 Termes et définitions	32
3.2 Termes abrégés.....	34
4 Principe de la méthode de mesurage.....	34
5 Appareillage	35
5.1 Encapsulation du détecteur.....	35
5.2 Système cryogénique.....	35
5.3 Système de mesurage	37
6 Procédure de mesurage	38
6.1 Mesurage de la température	38
6.2 Mesurage du courant de commutation.....	38
6.3 Mesurage de R_D	39
7 Incertitude type.....	40
7.1 Incertitude de type A.....	40
7.2 Incertitude de type B.....	40
7.3 Tableau du bilan d'incertitude	41
7.4 Exigence d'incertitude	42
8 Rapport d'essai	42
8.1 Identification du dispositif en essai (DUT)	42
8.2 Conditions de mesurage et résultats mesurés	42
8.3 Rapport facultatif – Divers	43
Annexe A (informative) Résultats de l'essai interlaboratoire.....	44
A.1 Boîtiers des DUT	44
A.2 Conditions de mesurage.....	44
A.3 Résultats de mesurage.....	45
Bibliographie.....	49
Figure 1 – Exemple d'impulsion de comptage en obscurité dans le train d'impulsions représenté dans l'encadré.....	33
Figure 2 – Courbe schématique de R_D en fonction du courant de polarisation normalisé	35
Figure 3 – Schéma d'un système de mesurage DCR type.....	36
Figure 4 – Circuit équivalent pour le mesurage de DCR	37
Figure 5 – Courbe courant-tension ($I-U$) type d'un SSPD	39
Figure A.1 – Photographie du DUT équipé d'un SSPD et d'un capteur de température.....	44
Figure A.2 – Courbe $I-U$ et courbes R_D	46
Tableau 1 – Tableau du bilan d'incertitude pour R_D	42
Tableau A.1 – Données d'essai du DUT	46

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-22-3:2022

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

SUPRACONDUCTIVITÉ –

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

AVANT-PROPOS

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

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

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

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

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

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

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

Une liste de toutes les parties de la série IEC 61788, publiées sous le titre général Supraconductivité, se trouve sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous webstore.iec.ch dans les données relatives au document recherché. A cette date, le document sera

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

IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-22-3:2022

INTRODUCTION

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

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

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

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

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie.

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

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-22-3:2022

SUPRACONDUCTIVITÉ –

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

1 Domaine d'application

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

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

2 Références normatives

Le présent document ne contient aucune référence normative.

3 Termes, définitions et termes abrégés

3.1 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions 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>

3.1.1

comptage en obscurité

comptage enregistré sans photons incidents

Note 1 à l'article: Un exemple de comptage en obscurité est représenté à la Figure 1. L'encadré de la Figure 1 représente un train d'impulsions composé de nombreux comptages en obscurité, qui comportent la même forme d'impulsion.

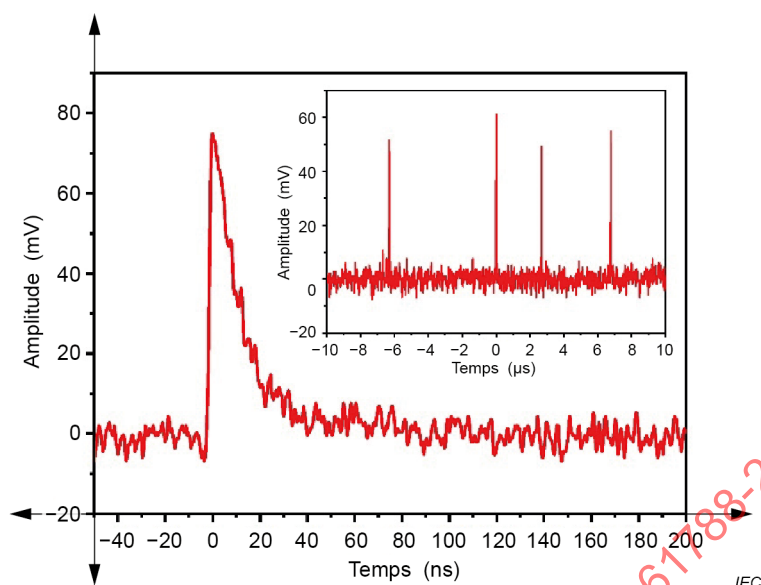


Figure 1 – Exemple d'impulsion de comptage en obscurité dans le train d'impulsions représenté dans l'encadré

3.1.2

taux de comptage en obscurité

DCR

R_D

nombre de comptages en obscurité par unité de temps

Note 1 à l'article: R_D est égal à la somme de R_{Db} et de R_{Di} qui sont définis ci-après.

Note 2 à l'article: L'abréviation " DCR " est dérivée du terme anglais développé correspondant " $dark count rate$ "

3.1.3

taux de comptage en obscurité de fond

R_{Db}

DCR généré par le rayonnement du corps noir des composants optiques et des photons parasites

3.1.4

taux de comptage en obscurité intrinsèque

R_{Di}

DCR généré par l'apparition spontanée d'une résistance à l'intérieur d'une bande supraconductrice

3.1.5

courant de polarisation

I_b

courant continu qui traverse la bande supraconductrice d'un SSPD afin de maintenir la condition de fonctionnement

3.1.6

courant de commutation

I_{sw}

courant de polarisation maximal pour les besoins du comptage des photons

Note 1 à l'article: La valeur de I_{sw} peut être déterminée comme le supercourant le plus élevé sur une courbe de courant-tension statique ($I-U$). Etant donné qu'une bande passe localement à l'état conducteur normal sous l'effet

du mécanisme de retour électrothermique, la valeur de I_{sw} est généralement inférieure à l'intensité du courant critique, à laquelle la bande totale passe à l'état conducteur normal.

3.1.7

courant de polarisation normalisé

$$I_b/I_{sw}$$

courant de polarisation divisé par le courant de commutation

3.1.8

courant de repiégeage

$$I_r$$

courant auquel un SSPD repasse d'un état conducteur normal à l'état supraconducteur lorsque l'intensité du courant de polarisation diminue par rapport à une valeur supérieure à I_{sw} .

3.2 Termes abrégés

R_D taux de comptage en obscurité

R_{Db} taux de comptage en obscurité de fond

R_{Di} taux de comptage en obscurité intrinsèque

I_b courant de polarisation

I_{sw} courant de commutation

T température

t intervalle de temps

I_r courant de repiégeage

V_{pp} amplitude des impulsions de sortie

N nombre de mesurages réalisés à une valeur spécifique de I_b et à T

u_A incertitude type de type A de R_D

u_B incertitude type de type B de R_D

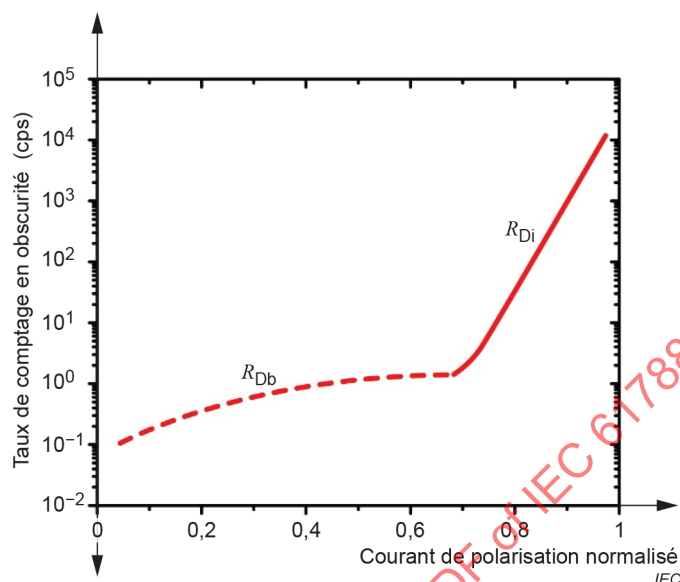
4 Principe de la méthode de mesure

DCR est divisé en deux composantes: le DCR de fond (R_{Db}) qui est généré par le rayonnement du corps noir des composants optiques et des photons parasites à une valeur donnée de I_b et le DCR intrinsèque (R_{Di}) qui est généré par l'apparition spontanée d'une résistance à l'intérieur d'une bande supraconductrice et qui est dominant dans une région à forte I_b proche de I_{sw} .

La Figure 2 représente une courbe schématique de la dépendance de R_D , vis-à-vis du courant de polarisation, qui est appelée courbe de R_D . Dans le montage de mesure où un SSPD est couplé à une fibre optique pour l'entrée du signal, la composante R_{Db} est dominante dans une région à faible I_b tandis que la composante R_{Di} est dominante dans une région à forte I_b . La composante R_{Db} a une dépendance relativement faible par rapport à I_b et elle est égale au produit du rendement de détection et de la somme des photons du corps noir et des photons parasites. D'autre part, la composante R_{Di} est liée aux événements de chute de tension spontanée, qui sont probablement dus à la nature dynamique du vortex par rapport aux propriétés intrinsèques des bandes supraconductrices.

Étant donné que R_{Db} dépend fortement de l'environnement de l'utilisateur, les courbes R_D doivent être mesurées dans une région de courant à forte polarisation où I_b/I_{sw} ($> 0,8$ à la Figure 2), dans laquelle R_{Di} est dominante, avec une contribution peu significative de R_{Db} .

Les courbes de R_D doivent être mesurées en comptant les impulsions de sortie sur une période donnée en différents points I_b tandis que la température du SSPD est maintenue constante à la température de fonctionnement recommandée par le fabricant. Il existe une relation approximativement linéaire entre $\lg(R_D)$ et le courant de polarisation normalisé lorsque $I_b/I_{sw} > 0,8$, comme cela est représenté à la Figure 2.



R_{Db} est dominante dans une région à faible polarisation.

R_{Di} est dominante dans une région à forte polarisation.

Figure 2 – Courbe schématique de R_D en fonction du courant de polarisation normalisé

5 Appareillage

5.1 Encapsulation du détecteur

Avant de caractériser un SSPD, il est nécessaire de réaliser le boîtier du détecteur. Pour les applications, la fonction la plus importante du boîtier est d'assurer un couplage efficace entre le flux lumineux et la surface active du SSPD. Un rendement de couplage élevé assure un rendement de détection élevé. Toutefois, pour le mesurage du R_{Di} du SSPD, un couplage optique est facultatif.

Lorsqu'un couplage optique est installé en option, le couplage fibronique est l'une des méthodes les plus couramment utilisées. La fibre optique doit être fixée dans le bloc en réalisant un couplage efficace et stable entre le flux lumineux et le détecteur. La température de l'extrémité de la fibre doit être la même que celle du bloc afin de réduire le plus possible R_{Db} . Le cœur de la fibre doit être aligné de manière axiale sur la surface active du SSPD afin d'assurer un couplage optique satisfaisant.

Afin d'assurer un contact thermique satisfaisant, lors du mesurage de R_{Di} , le SSPD doit être fixé au bloc d'encapsulation en appliquant de la pâte d'argent conductrice ou de l'époxy conducteur basse température. Le bloc doit être placé autour du SSPD afin d'éliminer les rayonnements de corps noir et ainsi un risque d'échauffement du SSPD. Il convient que le bloc soit réalisé en cuivre exempt d'oxygène et qu'il soit équipé d'un connecteur radiofréquence (RF).

5.2 Système cryogénique

Le système cryogénique le plus couramment utilisé pour le fonctionnement du SSPD est un cryostat reposant sur un cryoréfrigérateur mécanique à cycle fermé, par exemple un

cryoréfrigérateur Gifford-McMahon (GM) ou un cryoréfrigérateur à tube pulsé, qui assure une température de base inférieure à 4 K. Le bloc d'encapsulation est fixé sur une plaque à tête froide qui présente un contact thermique satisfaisant, afin de restituer une température identique à celle de la plaque. Etant donné qu'un champ géomagnétique n'entraîne aucune variation notable du DCR , aucun écran magnétique n'est ainsi nécessaire.

La température du bloc d'encapsulation doit être mesurée au moyen d'un capteur de température étalonné lors du mesurage de R_D . La procédure de mesurage de la température est décrite au 6.1.

Il convient d'installer les câbles à fibres optiques et les câbles coaxiaux à l'intérieur du cryostat afin d'assurer la connexion optique et électronique entre le boîtier du détecteur et le circuit de mesurage à température ambiante.

Comme cela est représenté à la Figure 3, une extrémité de la fibre (trait bleu) est fixée au boîtier du détecteur. L'autre extrémité de la fibre est raccordée à un connecteur fibronique (carré plein bleu) situé à la surface de la chambre du cryostat à température ambiante. Pour le mesurage de R_{D1} , il convient de retirer la fibre, ensuite le détecteur est entièrement protégé par un écran contre les rayonnements de corps noir et les photons parasites.

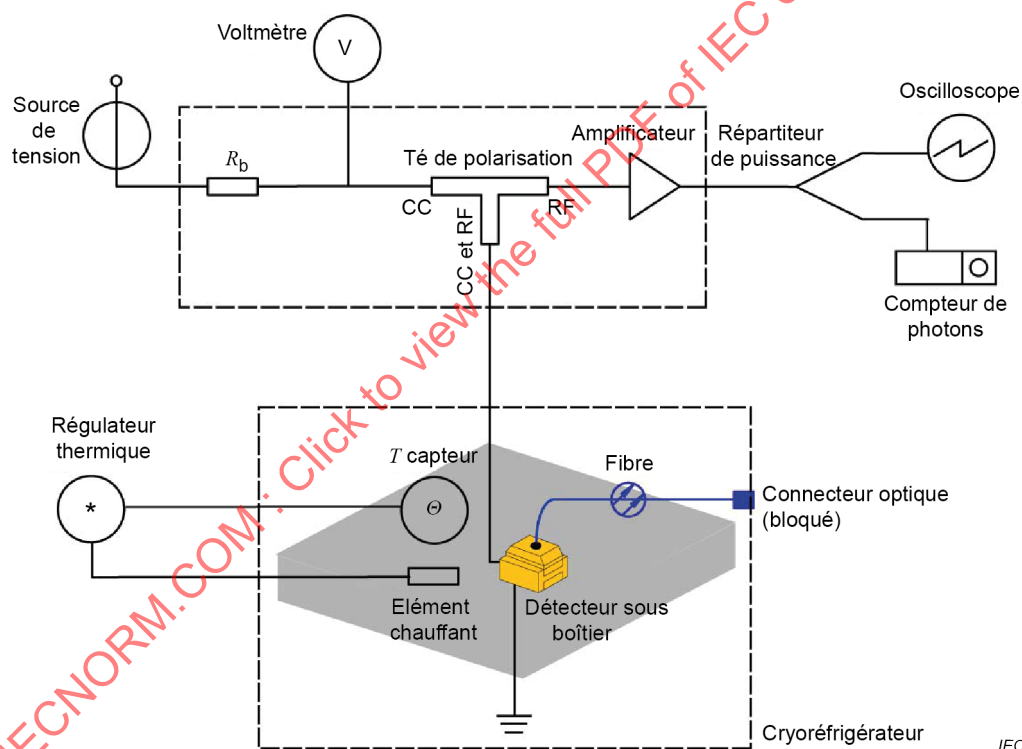


Figure 3 – Schéma d'un système de mesurage DCR type

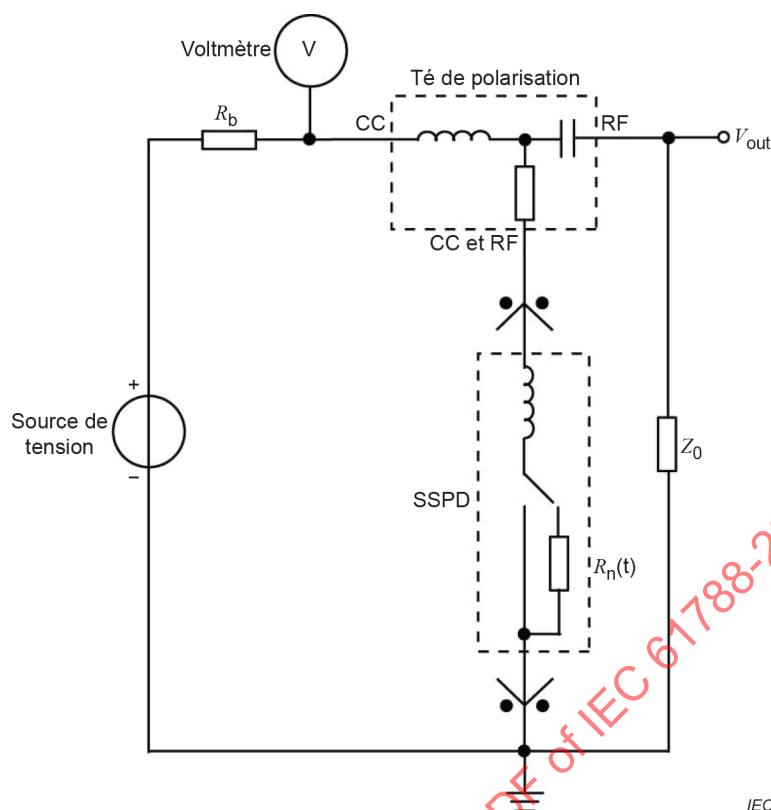


Figure 4 – Circuit équivalent pour le mesurage de *DCR*

5.3 Système de mesurage

La Figure 3 et la Figure 4 représentent respectivement le schéma d'un système de mesure type et le circuit équivalent pour le mesurage de *DCR*. Le SSPD placé à l'intérieur du boîtier du détecteur est relié au té de polarisation au moyen d'un câble coaxial. La source de tension montée en série avec la résistance de polarisation (R_b) délivre un courant de polarisation stable au SSPD. La tolérance sur la résistance de polarisation doit être meilleure que $\pm 0,01\%$ (le signe $\pm$ représente les limites de tolérance supérieure et inférieure, qui sont différentes de l'incertitude élargie). Le courant de polarisation est injecté dans le détecteur par l'accès en courant continu (CC) du té de polarisation. Les impulsions de sortie sont ensuite extraites de l'accès RF, puis amplifiées par un amplificateur RF à faible bruit et à large bande. L'amplificateur doit couvrir la plage 100 kHz à 500 MHz au minimum afin d'éviter une distorsion de la forme d'onde des impulsions. L'impédance d'entrée de l'amplificateur doit être de 50 Ω pour obtenir un affaiblissement de réflexion supérieur à 15 dB et ainsi réduire les impulsions rétro réfléchies. Il convient de surveiller les impulsions amplifiées au moyen d'un oscilloscope; celles-ci doivent être comptées par un appareil de comptage.

Un meilleur rapport signal sur bruit peut être obtenu lorsqu'un té de polarisation et un amplificateur appropriés sont mis en fonctionnement à basse température. Toutefois, l'opération cryogénique est facultative, car aucune variation du *DCR* n'est présumée se produire en ajustant correctement une valeur de seuil pour le comptage des impulsions de sortie.

Afin de réduire ou d'éliminer le bruit électromagnétique de l'environnement, tous les dispositifs électroniques du système de mesure sont protégés par une enveloppe métallique, qu'il convient également de relier à la borne de terre. Pour éviter la différence de potentiel entre les composants du circuit, il y a lieu de stabiliser la tension de phase par rapport à la terre et de limiter la tension transitoire; il convient que la résistance à la terre soit inférieure à 4 Ω . Il convient que la longueur du fil de mise à la terre entre les instruments et la terre soit inférieure à 2 m.

6 Procédure de mesurage

6.1 Mesurage de la température

Un capteur de température cryogénique, par exemple une diode Si, avec une exactitude étalonnée de ± 12 mK dans une plage de températures de travail, doit être utilisé pour surveiller la valeur de T et sa fluctuation au niveau du boîtier du détecteur, qui doit être solidement fixé au bloc du boîtier ou aussi près du bloc que possible. La température de fonctionnement doit être maintenue constante en utilisant un régulateur thermique en conjonction avec un élément chauffant fixé à la tête froide.

Étant donné que le DCR est sensible à la température, il est nécessaire de mesurer sa fluctuation lors du mesurage de DCR . La fluctuation est définie en effectuant la soustraction des températures inférieure et supérieure à une température moyenne.

En règle générale, les fluctuations de la température à court terme de la tête froide du cryoréfrigérateur peuvent être maintenues au-dessous de 12 mK. Toutefois, les fluctuations à long terme peuvent être influencées par la température ambiante. Par conséquent, lors des mesurages de DCR , il convient d'enregistrer régulièrement plus de 10 mesures de T .

La valeur de température relevée lors des mesurages de R_D doit être moyennée et consignée de la manière indiquée à l'Article 8. La régulation de température exigée correspond à $\pm 0,5$ % de la température moyenne relevée lors des mesurages. Les valeurs de DCR mesurées à différentes températures de fonctionnement peuvent être consignées pour une large gamme d'applications.

6.2 Mesurage du courant de commutation

Le courant de commutation (I_{sw}) doit être mesuré avant de procéder au mesurage de R_D . Le boîtier du détecteur doit être refroidi dans un cryostat au moyen d'un refroidisseur mécanique ou d'un liquide cryogénique jusqu'à la température de base, puis cette température doit être régulée. Lorsque la valeur lue du régulateur thermique atteint la température de fonctionnement, il convient de respecter un intervalle de plus de 10 min avant de commencer le mesurage de la courbe $I-U$. Il convient de mesurer la courbe $I-U$ en utilisant le canal en courant continu de la Figure 3, où la source de tension est reliée à R_b et au détecteur monté en série. La Figure 5 représente une courbe $I-U$ type.

Il est admis d'effectuer un mesurage de $I-U$ à deux bornes en lieu et place d'un mesurage à quatre bornes en raison de la résistance élevée du SSPD lorsque celui-ci est à l'état conducteur normal. Il convient d'appliquer la procédure suivante pour le mesurage de la courbe $I-U$.

- Il convient d'effectuer un balayage progressif de haut en bas de la tension produite par une source de tension afin d'obtenir une courbe $I-U$ statique.
- Il convient de mesurer la chute de tension en courant continu aux bornes du SSPD (U_{SSPD}) au moyen d'un voltmètre.

Le courant qui traverse le détecteur peut être calculé à partir des valeurs de U_{source} , R_b et

$$I_{SSPD} = I_{R_b} = \frac{U_{source} - U_{SSPD}}{R_b}$$

U_{SSPD} en utilisant . La boucle de balayage atteint le courant le plus élevé à I_{sw} . En aval de ce point, la valeur de I_{SSPD} diminue sur toute la longueur de la ligne de charge. Lorsqu'une partie de la bande passe à l'état conducteur normal, U_{SSPD} continue à augmenter. Lorsque la tension diminue par rapport à la tension maximale, le SSPD repasse à un état de tension nulle à I_r .

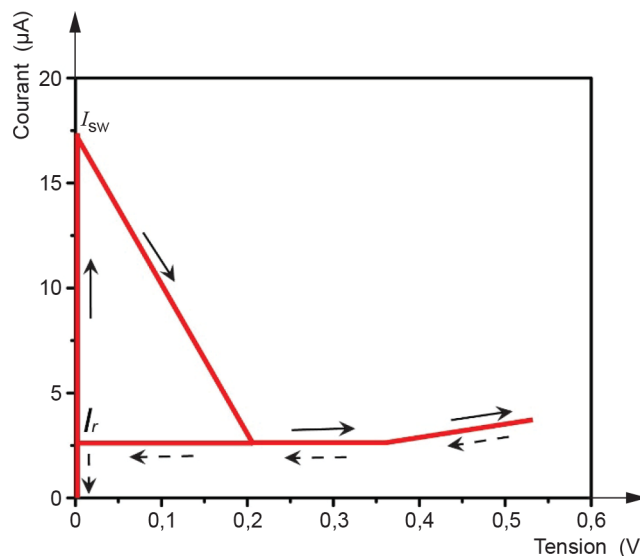


Figure 5 – Courbe courant-tension (I - U) type d'un SSPD

6.3 Mesurage de R_D

La méthode suivante doit être appliquée pour le mesurage de DCR

- La température du boîtier du détecteur doit être réglée à la température de fonctionnement appropriée recommandée pour l'utilisation du SSPD.
- Lors du mesurage de DCR , la fluctuation de température doit être réglée à $\pm 0,5$ % de la température moyenne.
- La tension de discrimination du comptage des photons doit être réglée à une valeur comprise entre $0,5 V_{pp}$ et $0,9 V_{pp}$, où V_{pp} est l'amplitude des impulsions de sortie du détecteur. La valeur de V_{pp} est égale à $50 \Omega (I_b - I_r) G$, où G représente le gain de l'amplificateur.
- Le compteur d'impulsions enregistre le nombre de comptages en obscurité générés dans un intervalle de temps (t). L'intervalle de temps du compteur doit être réglé à une valeur, par exemple 10 s, de manière à ce que l'incertitude type relative de type A de u_A / R_D soit inférieure à la valeur 14 % indiquée au 7.4. R_D est obtenu en divisant le nombre de comptages par t .
- La valeur R_D mesurée à chaque point I_b spécifique doit être enregistrée N fois. Les valeurs moyennes de $\overline{R_D}$ doivent être calculées à l'aide de la Formule (1). N doit être supérieur à 10.

$$\overline{R_D} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N R_{Dj} \quad (1)$$

- Une courbe R_D doit être mesurée en augmentant I_b en procédant par petits incréments dans une plage comprise entre $0,9 \times I_{sw}$ et I_{sw} afin d'obtenir plus de 5 points de données. La procédure décrite de d) à e) doit être répétée jusqu'à ce que I_b se situe immédiatement au-dessous de I_{sw} .
- La dépendance des courbes de R_D vis-à-vis de la température peut éventuellement être mesurée en faisant varier la température de fonctionnement. La procédure décrite de d) à f) doit être répétée lors du mesurage de la dépendance vis-à-vis de la température.

7 Incertitude type

7.1 Incertitude de type A

L'incertitude de type A de R_D , qui est l'incertitude de mesure fondée sur une analyse statistique, est évaluée en procédant à la mesure de R_D N fois à chaque point de polarisation normalisé I_b/I_{sw} [5] [6].

L'incertitude type u_A qui est l'écart-type du DCR moyen doit être calculée à l'aide de la Formule (2) à chaque point I_b .

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (R_{Dj} - \overline{R_D})^2} \quad (2)$$

La valeur de u_A à un courant de polarisation normalisé de 0,955, qui constitue la deuxième valeur la plus élevée du Tableau A.3, est utilisée pour établir le tableau du bilan du Tableau 1 et pour évaluer l'incertitude type de cette méthode de mesurage. Le point de polarisation normalisé de 0,955 est approprié pour cette évaluation u_A , car la valeur de $\overline{R_D}$ à ce point de polarisation est suffisamment élevée pour réaliser une analyse statistique et par ailleurs, les deux sensibilités de R_D à la température et au courant sont calculables au 7.2 (Incertitude de type B).

L'incertitude type relative maximale de $u_A/\overline{R_D}$ doit être maintenue au-dessous de 14 % pour l'ensemble des points de polarisation comme cela est exigé au 7.4.

7.2 Incertitude de type B

L'incertitude de type B sur R_D , qui correspond à l'évaluation de l'incertitude par d'autres méthodes que l'analyse statistique, inclut l'incertitude liée aux fluctuations présentes lors du mesurage de température et à celles de la source de tension pour la polarisation du courant [5] [6]. La fonction de densité de probabilité uniforme est présumée pour calculer l'écart-type de la température u_T et du courant u_{I_b} . L'incertitude u_B est exprimée par la Formule (3),

$$u_B = \sqrt{\left(\frac{\partial R_D}{\partial T}\right)^2 \times u_T^2 + \left(\frac{\partial R_D}{\partial I_b}\right)^2 \times u_{I_b}^2} \quad (3)$$

Où $\partial R_D / \partial T$ est la sensibilité de R_D à une variation de température T , $\partial R_D / \partial I_b$ est la sensibilité de R_D à une variation du courant de polarisation I_b ; u_T et u_{I_b} sont respectivement les valeurs d'écart-type pour la température et le courant.

Les valeurs $\partial R_D / \partial T$ et $\partial R_D / \partial I_b$ sont calculées à chaque point d'une plage de valeurs supérieures à $I_b / I_{sw} = 0,9$ pour les données décrites à l'Annexe A, par exemple. La sensibilité à la température est évaluée en utilisant l'expression $[R_D(2,26 \text{ K}) - R_D(2,34 \text{ K})] / 0,08 \text{ K}$, soit $195\,098,8 \text{ cps/K}$ à $I_b / I_{sw} = 0,955$. La sensibilité au courant exprimée par $[R_D(5,20 \text{ } \mu\text{A}) - R_D(5,30 \text{ } \mu\text{A})] / 0,1 \text{ } \mu\text{A}$ est égale à $73\,791,0 \text{ cps/}\mu\text{A}$ à $5,25 \text{ } \mu\text{A}$ ($I_b / I_{sw} = 0,955$) avec une température de fonctionnement de $2,300 \text{ K}$. Comme $\partial R_D / \partial I_b$ à $5,30 \text{ } \mu\text{A}$ n'est pas faisable, les données obtenues à $5,25 \text{ } \mu\text{A}$ sont utilisées pour établir le Tableau 1. Le Tableau A.2 indique

que les valeurs de sensibilité relative de $\left(\frac{\partial R_D}{\partial T}\right) / \overline{R_D}$ ($\approx 30 \% \text{ à } 36 \%$) et $\left(\frac{\partial R_D}{\partial I_b}\right) / \overline{R_D}$ ($\approx 13 \% \text{ à } 14 \%$) sont quasiment indépendantes de T et de I_b ; il en résulte que l'incertitude relative de type B est également quasiment indépendante de T et de I_b . Le calcul effectué avec les données obtenues à $5,25 \text{ } \mu\text{A}$ est statistiquement plus précis que celui effectué avec des points de polarisation inférieurs, car la valeur $\overline{R_D}$ demeure la plus élevée, excepté celle obtenue à $5,30 \text{ } \mu\text{A}$. Par conséquent, le calcul de l'incertitude à l'aide des données obtenues à $5,25 \text{ A}$ est acceptable.

La valeur de u_T est évaluée en appliquant un écart-type découlant de la précision des capteurs de température et des fluctuations de température aléatoires du système cryogénique. Un capteur de température de type diode Si possède une exactitude étalonnée de $\pm 12 \text{ mK}$ dans une plage de températures de travail comprise entre $1,4 \text{ K}$ et $10,0 \text{ K}$. Les capteurs de température ont, par hypothèse, une fonction de densité de probabilité uniforme de $\pm 12 \text{ mK}$, qui représente les limites de tolérance supérieure et inférieure de l'étalonnage de température.

L'écart-type du capteur de température est de $24 \text{ mK} / 2 / \sqrt{3} \approx 6,9 \text{ mK}$. La régulation de température exigée au 7.4 correspond à $\pm 0,5 \%$ de la température moyenne relevée lors des mesurages. A $2,3 \text{ K}$ lors du mesurage décrit à l'Annexe A, la valeur est de $\pm 11,5 \text{ mK}$ et l'écart-type est de $23 \text{ mK} / 2 / \sqrt{3} \approx 6,6 \text{ mK}$. Les fluctuations de température aléatoires mesurées lors du mesurage décrit à l'Annexe A sont d'environ $\pm 5 \text{ mK}$, ce qui constitue une valeur largement inférieure à l'exigence établie. Par conséquent, l'écart-type de la température

dans le présent document est de $u_T = \sqrt{(6,9 \text{ mK})^2 + (6,6 \text{ mK})^2} \approx 9,5 \text{ mK}$.

La valeur de u_{Ib} est évaluée par l'écart-type lié à la précision type des sources de tension et la tolérance sur la résistance de polarisation. La valeur efficace du bruit de la source de tension utilisée à l'Annexe A est de $10 \text{ } \mu\text{V}$, de sorte que l'écart-type de $10 \text{ } \mu\text{V}$ est maximal à une tension de sortie nulle. Il diminue à mesure que la tension de sortie augmente. La valeur maximale est utilisée pour établir le tableau du bilan. En prenant la résistance de la résistance de polarisation normalisée comme étant égale à $20 \text{ k}\Omega$ avec une tolérance de $\pm 0,01 \%$ (le signe $\pm$ représente les limites de tolérance supérieure et inférieure, qui sont différentes de l'incertitude élargie), l'écart-type est de $20 \text{ k}\Omega \times 0,000 1 / \sqrt{3} \approx 1,15 \text{ } \Omega$ dans une fonction de densité de probabilité

uniforme. La variance de U/R_b à $0,106 \text{ V}$ ($I_b = 5,25 \text{ } \mu\text{A}$) à la Figure A.2 est $u^2\left(\frac{U}{R_b}\right) = (10 \text{ } \mu\text{V} / 20 \text{ k}\Omega)^2 + (0,106 \text{ V} / (20 \text{ k}\Omega))^2 \times 1,15 \text{ } \Omega^2 \approx 3,43 \times 10^{-7} (\text{ } \mu\text{A})^2$. Par conséquent, la valeur u_{Ib} de $5,9 \times 10^{-4} \text{ } \mu\text{A}$ est utilisée pour l'évaluation figurant au 7.3.

7.3 Tableau du bilan d'incertitude

L'estimation type de l'incertitude type figurant dans le présent document est récapitulée dans le Tableau 1. La valeur d'incertitude type totale de u_{total} à une valeur I_b spécifique de $5,25 \text{ } \mu\text{A}$ ($I_b / I_{sw} = 0,955$) est calculée en additionnant l'incertitude de type A u_A et l'incertitude de type B u_B selon la loi sur la propagation. La valeur de u_{total} à $5,25 \text{ } \mu\text{A}$ représente l'incertitude type totale du présent document, comme cela est décrit au 7.1 et au 7.2.