

**NORME  
INTERNATIONALE  
INTERNATIONAL  
STANDARD**

**CEI  
IEC  
62088**

Première édition  
First edition  
2001-06

---

---

---

**Instrumentation nucléaire –  
Photodiodes pour détecteurs à scintillation –  
Méthodes d'essai**

**Nuclear instrumentation –  
Photodiodes for scintillation detectors –  
Test procedures**



Numéro de référence  
Reference number  
CEI/IEC 62088:2001

## Numérotation des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000. Ainsi, la CEI 34-1 devient la CEI 60034-1.

## Editions consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

## Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique. Des renseignements relatifs à cette publication, y compris sa validité, sont disponibles dans le Catalogue des publications de la CEI (voir ci-dessous) en plus des nouvelles éditions, amendements et corrigenda. Des informations sur les sujets à l'étude et l'avancement des travaux entrepris par le comité d'études qui a élaboré cette publication, ainsi que la liste des publications parues, sont également disponibles par l'intermédiaire de:

- **Site web de la CEI ([www.iec.ch](http://www.iec.ch))**
- **Catalogue des publications de la CEI**

Le catalogue en ligne sur le site web de la CEI ([www.iec.ch/catlg-f.htm](http://www.iec.ch/catlg-f.htm)) vous permet de faire des recherches en utilisant de nombreux critères, comprenant des recherches textuelles, par comité d'études ou date de publication. Des informations en ligne sont également disponibles sur les nouvelles publications, les publications remplaçées ou retirées, ainsi que sur les corrigenda.

- **IEC Just Published**

Ce résumé des dernières publications parues ([www.iec.ch/JP.htm](http://www.iec.ch/JP.htm)) est aussi disponible par courrier électronique. Veuillez prendre contact avec le Service client (voir ci-dessous) pour plus d'informations.

- **Service clients**

Si vous avez des questions au sujet de cette publication ou avez besoin de renseignements supplémentaires, prenez contact avec le Service clients:

Email: [custserv@iec.ch](mailto:custserv@iec.ch)  
Tél: +41 22 919 02 11  
Fax: +41 22 919 03 00

## Publication numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series. For example, IEC 34-1 is now referred to as IEC 60034-1.

## Consolidated editions

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

## Further information on IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology. Information relating to this publication, including its validity, is available in the IEC Catalogue of publications (see below) in addition to new editions, amendments and corrigenda. Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is also available from the following:

- **IEC Web Site ([www.iec.ch](http://www.iec.ch))**
- **Catalogue of IEC publications**

The on-line catalogue on the IEC web site ([www.iec.ch/catlg-e.htm](http://www.iec.ch/catlg-e.htm)) enables you to search by a variety of criteria including text searches, technical committees and date of publication. Online information is also available on recently issued publications, withdrawn and replaced publications, as well as corrigenda.

- **IEC Just Published**

This summary of recently issued publications ([www.iec.ch/JP.htm](http://www.iec.ch/JP.htm)) is also available by email. Please contact the Customer Service Centre (see below) for further information.

- **Customer Service Centre**

If you have any questions regarding this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre:

Email: [custserv@iec.ch](mailto:custserv@iec.ch)  
Tel: +41 22 919 02 11  
Fax: +41 22 919 03 00

# NORME INTERNATIONALE INTERNATIONAL STANDARD

CEI  
IEC  
62088

Première édition  
First edition  
2001-06

## Instrumentation nucléaire – Photodiodes pour détecteurs à scintillation – Méthodes d'essai

## Nuclear instrumentation – Photodiodes for scintillation detectors – Test procedures

© IEC 2001 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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'éditeur.

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 the publisher.

International Electrotechnical Commission  
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembé Geneva, Switzerland  
e-mail: [inmail@iec.ch](mailto:inmail@iec.ch)

IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale  
International Electrotechnical Commission  
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX  
PRICE CODE

Q

*Pour prix, voir catalogue en vigueur  
For price, see current catalogue*

## SOMMAIRE

AVANT-PROPOS .....	4
INTRODUCTION .....	6
1 Domaine d'application et objet .....	8
2 Généralités .....	8
3 Références normatives .....	10
4 Définitions, symboles et abréviations .....	10
4.1 Définitions .....	10
4.2 Symboles et abréviations .....	12
5 Caractéristiques physiques .....	14
5.1 Surface utile, $A$ .....	14
5.2 Fenêtre .....	18
6 Caractéristiques électriques .....	18
6.1 Généralités .....	18
6.2 Capacité .....	18
6.3 Courant de fuite, $I_f$ , et caractéristique courant - tension, $I(U)$ .....	18
6.3.1 Mesure .....	18
6.3.2 Variation avec la température .....	18
6.4 Temps de montée .....	20
6.5 Préamplificateurs et amplificateurs utilisés avec des détecteurs à scintillation à photodiode .....	20
6.6 Mesures du bruit et de la résolution .....	20
6.7 Gain des photodiodes à avalanche ( $G$ ) .....	20
6.7.1 Généralités .....	20
6.7.2 Mesure .....	20
6.7.3 Variation du gain avec la température .....	26
7 Caractéristiques optiques .....	26
7.1 Généralités .....	26
7.2 Efficacité quantique ( $\eta$ ) .....	26
7.3 Sensibilité énergétique ( $s$ ) .....	28
7.4 Réponse spectrale .....	28
7.5 Puissance équivalente de bruit .....	32
8 Spécifications générales et notice technique .....	32

## CONTENTS

FOREWORD .....	5
INTRODUCTION .....	7
1 Scope and object .....	9
2 General .....	9
3 Normative references .....	11
4 Definitions, symbols and abbreviations .....	11
4.1 Definitions .....	11
4.2 Symbols and abbreviations .....	13
5 Physical characteristics .....	15
5.1 Active area, $A$ .....	15
5.2 Window .....	19
6 Electrical characteristics .....	19
6.1 General .....	19
6.2 Capacitance .....	19
6.3 Leakage current, $I_r$ , and current – voltage characteristic, $I(U)$ .....	19
6.3.1 Measurement .....	19
6.3.2 Temperature dependence .....	19
6.4 Rise time .....	21
6.5 Preamplifiers and amplifiers used with photodiode scintillation detectors .....	21
6.6 Noise and resolution measurements .....	21
6.7 Gain of avalanche photodiodes (G) .....	21
6.7.1 General .....	21
6.7.2 Measurement .....	21
6.7.3 Temperature dependence of the gain .....	27
7 Optical characteristics .....	27
7.1 General .....	27
7.2 Quantum efficiency ( $\eta$ ) .....	27
7.3 Responsivity ( $s$ ) .....	29
7.4 Spectral response .....	29
7.5 Noise-equivalent power .....	33
8 General requirements – Data sheet .....	33

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

## INSTRUMENTATION NUCLÉAIRE -

Photodiodes pour détecteurs à scintillation –  
Méthodes d'essai

## AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Électrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI 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, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. 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 la CEI, participent également aux travaux. La CEI 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 la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, spécifications techniques, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 62088 a été établie par le comité d'études 45 de la CEI: Instrumentation nucléaire.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
45/492/FDIS	45/497/RVD

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

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 3.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant 2005. A cette date, la publication sera

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

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

## NUCLEAR INSTRUMENTATION –

**Photodiodes for scintillation detectors –  
Test procedures**

## FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the 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, the IEC publishes International Standards. 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. The 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 the 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 National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical specifications, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 62088 has been prepared by IEC technical committee 45: Nuclear instrumentation.

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

FDIS	Report on voting
45/492/FDIS	45/497/RVD

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

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 3.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2005. At this date, the publication will be

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

## INTRODUCTION

Un détecteur à scintillation à photodiode est un dispositif où une photodiode semiconductrice (en général une PD silicium) est utilisée pour détecter les scintillations lumineuses produites dans un scintillateur (en général un cristal) lorsque des rayonnements incidents (par exemple particules chargées, rayonnements gamma et X) y déposent de l'énergie (voir figure 1).

Les photomultiplicateurs (PM) sont communément utilisés à cette fin depuis des décennies, mais avec l'apparition récente de photodiodes à faible bruit et de surface relativement grande, ces dernières concurrencent les photomultiplicateurs dans un nombre croissant d'applications, grâce à certaines caractéristiques spécifiques:

- faible volume,
- insensibilité aux champs magnétiques,
- basse tension de polarisation et puissance consommée très faible,
- résistance aux chocs comparativement supérieure.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62088:2001

## INTRODUCTION

A photodiode scintillation detector is a device which employs a semiconductor photodiode (generally a silicon PD) for the detection of scintillation light produced in a scintillator (generally a crystal) when incident radiation (i.e. charged particles, gamma-rays, X-rays) deposit energy in it (see figure 1).

Photomultiplier tubes (PMT) have been commonly used for this purpose for decades, but with the recent emergence of low noise and relatively large area photodiodes, the latter are competing with photomultipliers in an increasing number of applications, taking advantage of some intrinsic features:

- low volume,
- insensitivity to magnetic fields,
- low bias voltage and very low power consumption,
- comparatively higher shock resistance.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62088:2001

## INSTRUMENTATION NUCLÉAIRE –

### Photodiodes pour détecteurs à scintillation – Méthodes d'essai

#### 1 Domaine d'application et objet

Cette Norme internationale s'applique aux photodiodes solides (PD) et aux mosaïques de photodiodes solides (PDA) utilisées dans les détecteurs à scintillation ou dans les détecteurs Chérenkov. Les photodiodes à avalanche (APD) sont aussi couvertes par les méthodes d'essai préconisées dans cette norme, mais elles requièrent des essais spécifiques supplémentaires qui y sont également inclus.

Tous les essais décrits dans cette norme ne sont pas obligatoires, mais il convient que les essais utilisés pour spécifier les performances soient réalisés conformément aux procédures indiquées.

Le but de cette norme est d'établir des méthodes d'essai normalisées pour les photodiodes utilisées dans les détecteurs à scintillation et de définir les paramètres à fournir par le fabricant pour chaque type de photodiode.

#### 2 Généralités

Les photodiodes silicium sont disponibles commercialement et sont communément utilisées dans les détecteurs à scintillation. Mais leur réponse énergétique qui est maximale vers 900 nm est mal adaptée aux maxima d'émission des scintillateurs habituels, situés à des longueurs d'onde plus courtes (NaI(Tl), CsI(Tl), BGO, CdWO<sub>4</sub>, ZnSe(Te)). Des recherches sont en cours pour développer des photodiodes à partir de semiconducteurs à bande interdite plus large ou de scintillateurs émettant à des longueurs d'onde plus grandes.

Les détecteurs à scintillation à photodiode n'ont pas d'amplification interne (à l'exception des APD) et il est nécessaire de les coupler à des préamplificateurs à faible bruit similaires à ceux utilisés avec les détecteurs semiconducteurs. Le bruit de l'ensemble photodiode-préamplificateur limite son utilisation en spectrométrie des rayonnements gamma de faible énergie et des rayons X. Ce bruit est dominé par le bruit série dû à la capacité de la PD, qui croît avec sa surface, et par le bruit parallèle dû au courant de fuite de la PD et à la résistance d'entrée du préamplificateur. Afin d'optimiser l'ensemble photodiode-préamplificateur, ce dernier est parfois intégré avec la PD. Dans ce cas, certains des essais décrits ci-dessous peuvent être difficile à mettre en œuvre.

Les photodiodes solides peuvent aussi être utilisées comme détecteurs semiconducteurs à ionisation directe, mais la présente norme ne s'applique pas à cette utilisation qui est déjà couverte par la CEI 60333.

Cette norme n'est pas applicable aux photorécepteurs hybrides basés sur la technologie des tubes à vide, avec une photocathode conventionnelle, un champ électrique accélérateur et un dispositif de détection à état solide.

**NUCLEAR INSTRUMENTATION –****Photodiodes for scintillation detectors –  
Test procedures****1 Scope and object**

This International Standard applies to solid-state photodiodes (PD) and solid-state photodiode arrays (PDA) used in scintillation detectors or in Cherenkov detectors. Avalanche photodiodes (APD) are also covered by the test methods recommended in this standard, but they need some additional specific tests also described in this standard.

Not all tests described in this standard are mandatory, but tests that are used to specify performance should be carried out in accordance with the procedures described herein.

The intent of this standard is to establish standard test procedures for photodiodes used in scintillation detectors and to define the parameters which shall be provided by the supplier for each type of photodiode.

**2 General**

Silicon photodiodes are readily available and widely used in scintillation detection. However, their peak responsivity, around 900 nm, does not match the maximum emission at shorter wavelengths of usual scintillators (NaI(Tl), CsI(Tl), BGO, CdWO<sub>4</sub>, ZnSe(Te)). Research is under way to develop photodiodes from higher bandgap semiconductors or scintillators with longer wavelength light emission.

Photodiode scintillation detectors have no internal amplification (except in the case of APDs) and need therefore to be coupled to low noise preamplifiers similar to those used with semiconductor detectors. The noise of the photodiode/preamplifier combination limits its use in low energy gamma ray and X-ray spectrometry. This noise is dominated by the series noise due to the capacitance of the PD, which increases with its area, and by the parallel noise due to the leakage current and the input resistance of the preamplifier. In order to optimize the combination photodiode/preamplifier, the latter is sometimes integrated with the PD. In such a case, some of the tests described hereinafter may be difficult to perform.

The solid-state photodiodes can also be used as direct ionization semiconductor detectors, but the present standard does not apply to this application which is already covered by IEC 60333.

This standard does not apply to hybrid photodetectors, which are vacuum tubes with a conventional photocathode, an accelerating electric field and a solid state device.

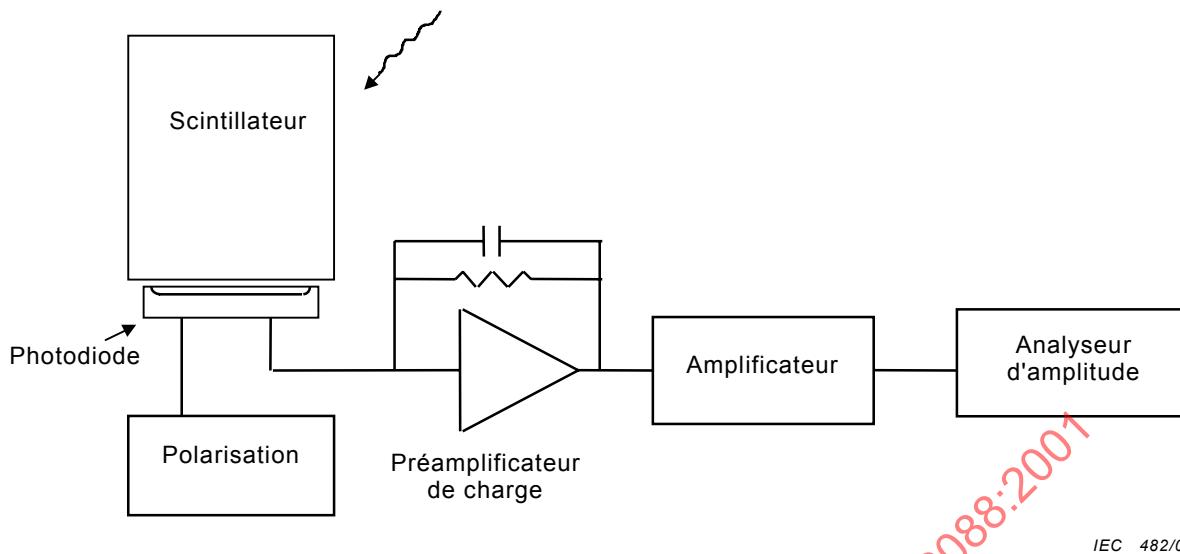


Figure 1 – Schéma d'un système avec détecteur à scintillation à photodiode

IEC 482/01

### 3 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente Norme internationale. Pour les références datées, les amendements ultérieurs ou les révisions de ces publications ne s'appliquent pas. Toutefois, les parties prenantes aux accords fondés sur la présente Norme internationale sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Pour les références non datées, la dernière édition du document normatif en référence s'applique. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 60050(731):1991, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 731: Télécommunications par fibres optiques*

CEI 60050(845):1987, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 845: Eclairage*

CEI 60333:1993, *Instrumentation nucléaire – Détecteurs semiconducteurs pour particules chargées – Méthodes d'essai*

CEI 61151:1992, *Instrumentation nucléaire – Amplificateurs et préamplificateurs utilisés avec des détecteurs de rayonnements ionisants – Méthodes d'essais*

### 4 Définitions, symboles et abréviations

#### 4.1 Définitions

Pour les besoins de la présente Norme internationale, les définitions suivantes sont applicables.

##### 4.1.1

##### photodiode à avalanche

photodiode fonctionnant avec une force électromotrice de polarisation, de telle sorte que le courant photoélectrique primaire subit une amplification par avalanche à la jonction

[VEI 845-05-40]

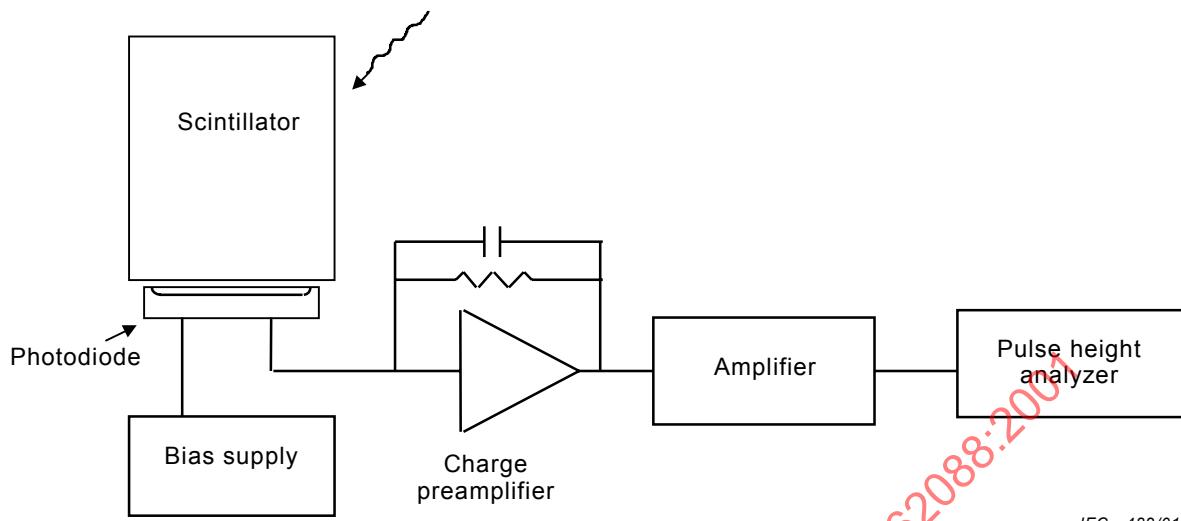


Figure 1 – Block diagram of a photodiode scintillation detector system

### 3 Normative references

The following normative documents contain provisions, which, through reference in this text, constitute provisions of this International Standard. For dated references, subsequent amendments to, or revisions of, any of these publications do not apply. However, parties to agreements based on this International Standard are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. For undated references, the latest edition of the normative document referred to applies. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 60050(731):1991, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 731: Optical fibre communication*

IEC 60050(845):1987, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 845: Lighting*

IEC 60333:1993, *Nuclear instrumentation – Semiconductor charged-particle detectors – Test procedures*

IEC 61151:1992, *Nuclear instrumentation – Amplifiers and preamplifiers used with detectors of ionization radiation – Test procedures*

### 4 Definitions, symbols and abbreviations

#### 4.1 Definitions

For the purpose of this International Standard, the following definitions apply.

##### 4.1.1

##### avalanche photodiode (APD)

photodiode operating with a bias electromotive force such that the primary photocurrent undergoes amplification through avalanche breakdown at the junction

[IEV 845-05-40]

**4.1.2****puissance équivalente de bruit (d'un photodéTECTeur)**

valeur de la *puissance rayonnante* à l'entrée d'un *photodéTECTeur* qui donne à la sortie un rapport signal sur bruit égal à l'unité, pour une longueur d'onde, une fréquence de modulation et une bande passante équivalente de bruit spécifiées

[VIEI 731-06-40]

**4.1.3****photocourant (courant photoélectrique) ( $I_{ph}$ )**

partie du courant de sortie d'un récepteur photoélectrique qui est produite par le rayonnement incident

[VIEI 845-05-52]

**4.1.4****photodiode**

récepteur photoélectrique dans lequel un courant photoélectrique est produit par l'absorption d'un rayonnement optique au voisinage d'une jonction p-n entre deux semiconducteurs ou d'une jonction entre un semiconducteur et un métal

[VIEI 845-05-39]

**4.1.5****sensibilité (d'un récepteur) (s)**

quotient de la réponse  $Y$  du récepteur par son excitation  $X$  ( $s = Y/X$ )

[VIEI 845-05-54]

**4.1.6****réponse spectrale**

sensibilité fonction de la longueur d'onde

NOTE La sensibilité est en général exprimée en ampères par watt et la longueur d'onde en nanomètres.

**4.2 Symboles et abréviations**

$A$	surface active
APD	photodiode à avalanche
$C$	capacité
$G$	gain d'une APD
$h\nu$	énergie du photon
$I_{ph}$	photocourant (courant photoélectrique)
$I_r$	courant de fuite
$I_{max}$	photocourant maximal autorisé
$I(U)$	caractéristique courant-tension
$\lambda$	longueur d'onde
$\lambda_p$	longueur d'onde de sensibilité énergétique maximale
$\eta$	efficacité quantique
$NEP$	puissance équivalente de bruit (noise equivalent power)
$P_{opt}$	puissance optique
PD	photodiode
PDA	mosaïque de photodiodes
$s$	sensibilité énergétique

**4.1.2****noise equivalent power (of a photodiode)****NEP** (abbreviation)

the value of the *radiant power* at the input to an *optical detector* which produces at the output a signal-to-noise ratio equal to one, for a given wavelength, modulation frequency and equivalent noise bandwidth

[IEV 731-06-40]

**4.1.3****photocurrent ( $I_{ph}$ )**

that part of the output current of a photoelectric detector, which is caused by incident radiation

[IEV 845-05-52]

**4.1.4****photodiode**

photoelectric detector in which a photocurrent is generated by absorption of optical radiation in the neighbourhood of a p-n junction between two semiconductors or a junction between a semiconductor and a metal

[IEV 845-05-39]

**4.1.5****responsivity; sensitivity (of a detector) (s)**

quotient of the detector output  $Y$  by the detector input  $X$  ( $s = Y/X$ )

[IEV 845-05-54]

**4.1.6****spectral response**

responsivity as a function of wavelength

NOTE Responsivity usually expressed in amperes per watt and wavelength in nanometers.

**4.2 Symbols and abbreviations**

$A$	active area
APD	avalanche photodiode
$C$	capacitance
$G$	gain of an APD
$h\nu$	photon energy
$I_{ph}$	photocurrent
$I_r$	leakage current
$I_{max}$	maximum allowed photocurrent
$I(U)$	current-voltage characteristic
$\lambda$	wavelength
$\lambda_p$	maximum responsivity wavelength
$\eta$	quantum efficiency
$NEP$	noise equivalent power
$P_{opt}$	optical power
PD	photodiode
PDA	photodiode array
$s$	responsivity

$T$	température
$T_{\max}/T_{\min}$	température maximale/minimale pour le fonctionnement de la photodiode
$U_b$	tension de polarisation
$U_{bn}$	tension de polarisation nominale de la PD
$U_{b\max}$	tension de polarisation maximale autorisée
$x_u$	longueur (ou diamètre) utile d'une trace de balayage (mesure de la surface active)

## 5 Caractéristiques physiques

### 5.1 Surface utile, $A$

La surface utile d'une PD est en général légèrement plus petite que la surface totale de la galette de semiconducteur. Ceci est dû au boîtier, à l'électrode, ou à la couche protectrice qui peut être nécessaire sur le bord de la jonction pour réduire le courant de fuite (et par conséquent le bruit).

La mesure de la surface utile doit être effectuée, comme l'indique la figure 2, en balayant toute la surface de la PD placée dans un noir ambiant total, à l'aide d'un faisceau collimaté de lumière incidente provenant d'une source lumineuse de référence de haute stabilité.

La PD doit être polarisée et connectée à un picoampèremètre en utilisant le montage conventionnel de mesure du courant de fuite ou de relevé de la caractéristique courant-tension (voir la CEI 60333).

La dimension du spot à la surface de la PD ainsi que le pas du balayage dans toute direction doivent être tous deux inférieurs à 1/20 de la plus grande dimension de la tranche de semiconducteur, et en tous cas, inférieurs à 0,5 mm (voir exemples à droite de la figure 2).

Pour chaque trace de balayage on reporte le courant mesuré de la PD comme indiqué sur la figure 2, et on détermine une longueur utile,  $x_u$ , définie comme la longueur de la trace où le photocourant est au moins égal à 90 % de sa valeur maximale. La surface utile, définie comme la surface où le photocourant est au moins égal à 90 % de sa valeur maximale, est calculée à partir de toutes les  $x_u$  individuelles de chacune des traces. Les détails du calcul doivent être indiqués.

La surface utile peut dépendre de la longueur d'onde de la lumière de balayage. En conséquence, on doit déterminer la surface utile pour plusieurs longueurs d'onde dans le domaine spectral utile de la PD. La mesure doit être effectuée au moins pour la longueur d'onde de sensibilité énergétique maximale  $\lambda_p$  à l'aide d'une source lumineuse monochromatique ou filtrée émettant à  $\lambda_p \pm 50$  nm.

La surface utile peut changer légèrement avec la tension de polarisation. Une mesure doit être effectuée au moins pour la tension nominale  $U_{bn}$ . La tension de polarisation doit être indiquée pour toutes les mesures.

Dans le cas des APD, la surface utile peut varier de manière significative avec la tension appliquée, car le facteur de multiplication peut varier légèrement d'un point à l'autre de la diode. En conséquence, il convient d'indiquer aussi la surface utile pour  $G = 1$ .

La présente mesure peut s'appliquer aussi aux mosaïques de photodiodes (PDA) par sommation des surfaces actives de chaque photodiode élémentaire.

$T$	temperature
$T_{\max}/T_{\min}$	temperature maximum/minimum for operating the photodiode
$U_b$	bias voltage
$U_{bn}$	nominal bias voltage of the PD
$U_{b\max}$	maximum allowed bias voltage
$x_u$	useful length (or diameter) of a scanning path (active area measurement)

## 5 Physical characteristics

### 5.1 Active area, $A$

The active area of a PD, which is the useful area, is usually slightly smaller than the overall area of the semiconductor wafer. This is due to the packaging or to the electrode or to the protective layer on the junction edge, which may be needed in order to minimize the leakage current (and consequently the noise).

Measurement of the active area shall be carried out, as shown in figure 2, by scanning the overall area of the PD placed in total ambient darkness with a collimated beam of incident light from a high stability reference light source.

The PD shall be biased and connected to a picoammeter using a conventional set-up as used for semiconductor detector leakage current measurement or current-voltage characteristic plotting (see IEC 60333).

Both the spot dimension on the surface of the PD and the scanning step in any direction shall be less than 1/20 of the largest dimension of the semiconductor wafer and, in all cases, less than 0,5 mm (see examples on the right of figure 2).

For each scanning path, the measured photocurrent of the PD is plotted as shown in figure 2 and a useful length,  $x_u$ , is determined as the length of the path where the photocurrent is at least equal to 90 % of its maximum value. The active area, defined as the area where the photocurrent is at least equal to 90 % of its maximum value, is computed from all the individual  $x_u$  determined for each scanning path. The computation details shall be stated.

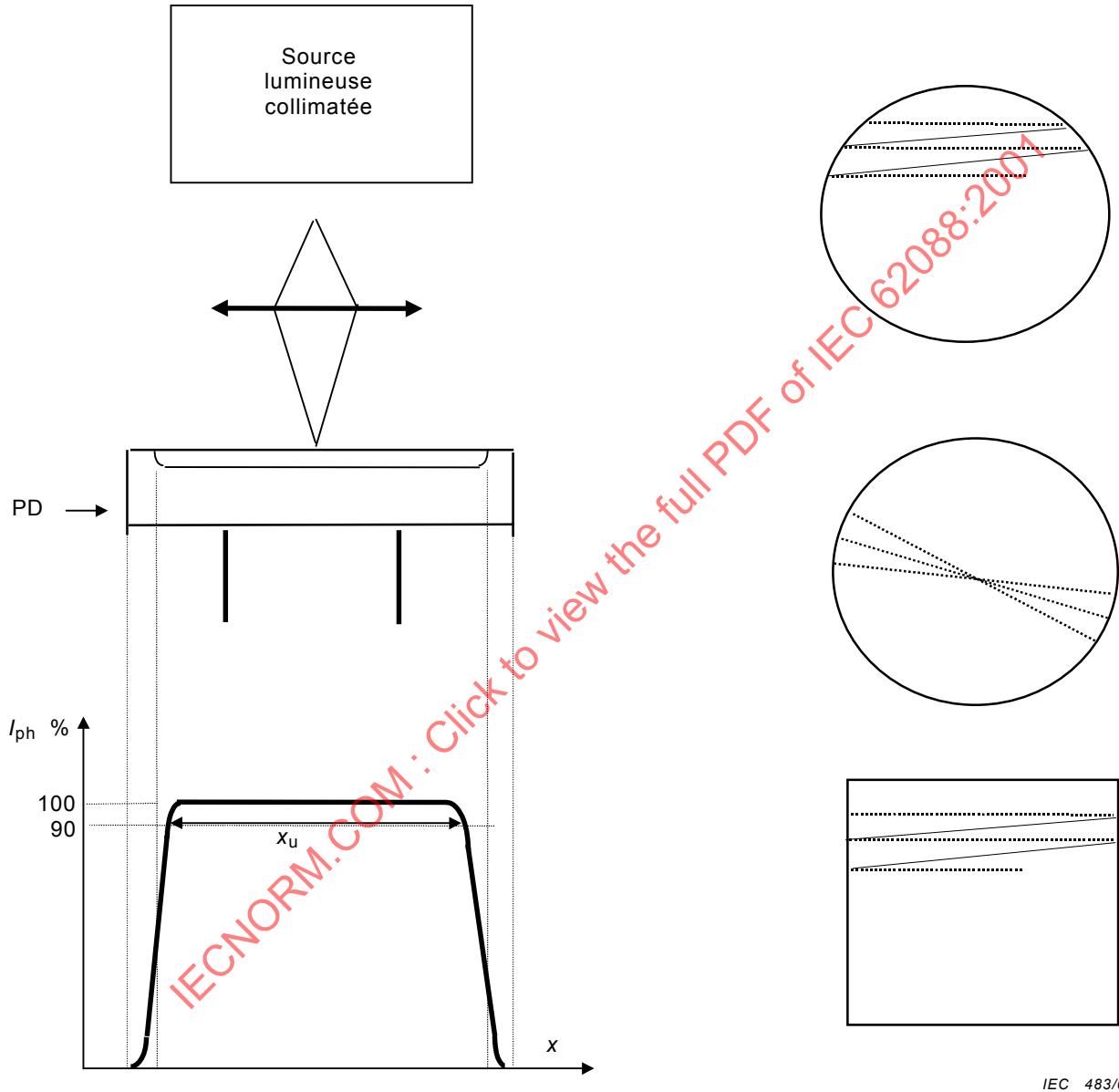
The active area may depend on the wavelength of the scanning light. Consequently, the active area shall be determined for several wavelengths in the useful spectral domain of the PD. The measurement shall be made at least for the maximum responsivity wavelength  $\lambda_p$  using a monochromatic or filtered light source emitting at  $\lambda_p \pm 50$  nm.

The active area may change slightly with the bias voltage. A measurement shall be carried out at least at the nominal bias voltage  $U_{bn}$ . The bias voltage shall be stated for all measurements.

For APDs, the active area may change significantly with applied voltage, as the multiplication factor may change slightly at different points of the device. Consequently, the active area for  $G = 1$  should also be determined and stated.

This measurement can also apply to photodiode arrays (PDAs) by summing the active areas of the elementary PDs.

Une méthode alternative consiste à utiliser une lumière pulsée et le système conventionnel d'amplification associé aux détecteurs à scintillation à photodiode pour mesurer le photocourant (voir 6.7.2.1). Pour des dispositifs intégrés, incluant dans un même boîtier la PD et le préamplificateur voire même le système d'amplification complet, cette méthode est impérative. Les amplitudes des impulsions amplifiées, qui sont proportionnelles aux impulsions de photocourant, sont relevées pour chaque pixel et ensuite  $x_u$  et la surface utile sont obtenues par la même méthode que ci-dessus.



**Figure 2 – Dispositif pour la mesure de la surface utile (en haut à gauche) et exemples de balayage**

An alternative method is to use pulsed light and the conventional amplification system of photodiode scintillation detectors to measure the pulsed photocurrent (see 6.7.2.1). For integrated devices, including in a same package the PD and the preamplifier or even the complete amplification system, this method shall be used. The amplitudes of the amplified pulses, which are proportional to the photocurrent pulses, are plotted for each pixel and then  $x_u$  and the active area are obtained in the same way as described above.

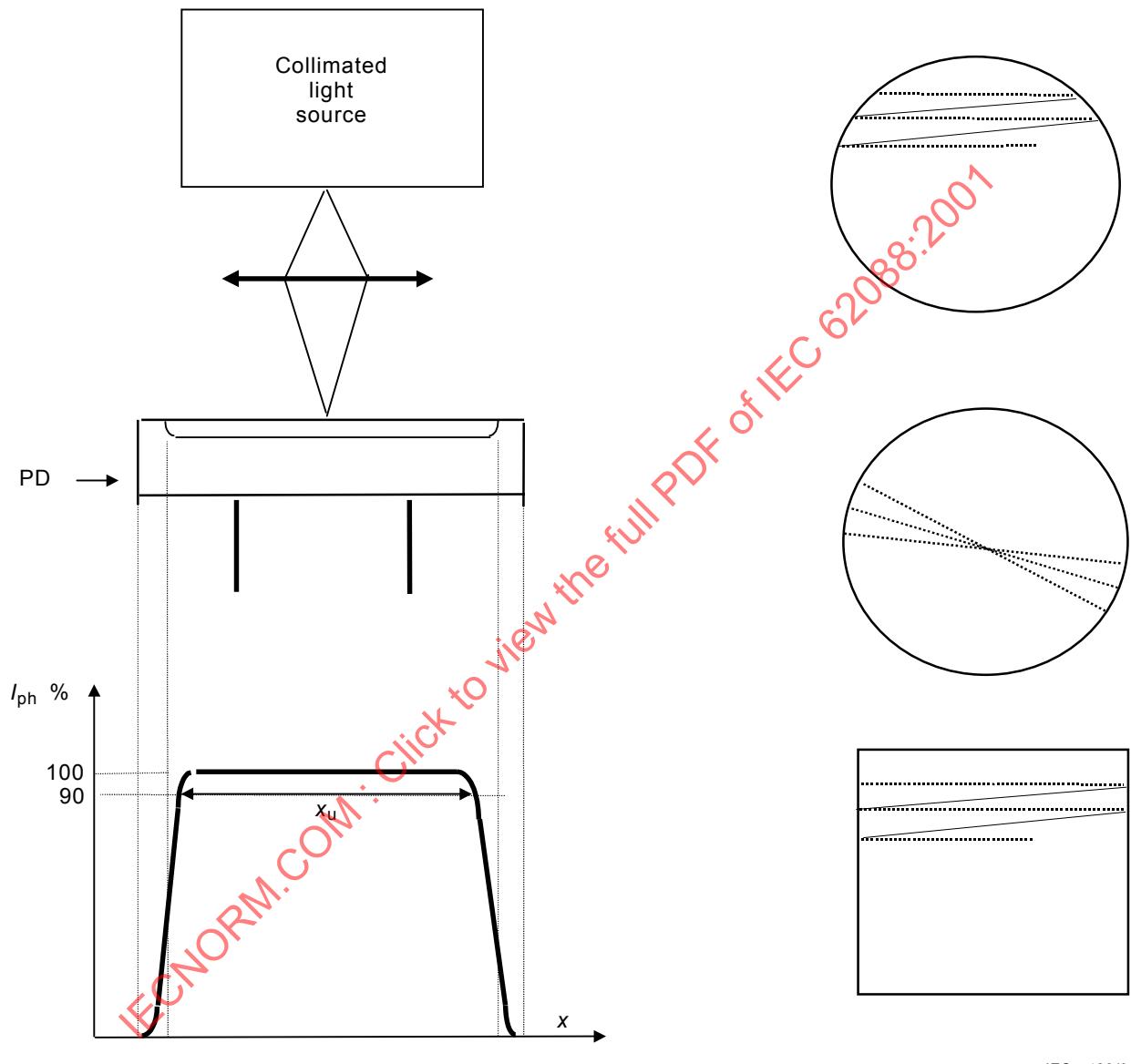


Figure 2 – Set-up for active area measurement (upper left) and scanning examples

## 5.2 Fenêtre

Bien qu'il existe aussi des PD sans fenêtre, la surface de la photodiode est généralement recouverte d'une couche protectrice (fenêtre) pour éviter les contraintes mécaniques dues au scintillateur, la rayure de la surface lors des manipulations ou la contamination par les gels utilisés pour le couplage optique.

Le fabricant doit indiquer (voir article 8, notice technique) le matériau de la fenêtre, son indice de réfraction ainsi que la possibilité de nettoyer la surface de la photodiode. Si le nettoyage est autorisé, il doit en préciser les conditions ainsi que le type de tissu et de solvant qui peuvent être utilisés pour éliminer toute souillure.

## 6 Caractéristiques électriques

### 6.1 Généralités

Les mesures des caractéristiques électriques de photodiodes sont, dans la majorité des cas, identiques à celles utilisées pour les détecteurs semiconducteurs à ionisation directe décrites dans la CEI 60333. C'est également le cas pour les paramètres liés à la détection nucléaire comme la résolution en énergie ou le bruit et la résolution électrique d'un système photodiode-scintillateur-amplificateur, comme décrit dans la CEI 60333.

### 6.2 Capacité

La méthode de mesure décrite dans la CEI 60333 est applicable.

La zone désertée,  $d$ , peut être calculée à partir de la surface,  $A$ , et de la capacité,  $C$  par:

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 A/d \quad (1)$$

où

$\epsilon_r$  est la permittivité relative du semiconducteur;

$\epsilon_0$  est la permittivité du vide;

$\epsilon_r$ ,  $\epsilon_0$ ,  $A$ ,  $d$ ,  $C$  sont exprimés dans le système international d'unités.

### 6.3 Courant de fuite, $I_r$ , et caractéristique courant – tension, $I(U)$

#### 6.3.1 Mesure

La méthode de mesure décrite dans la CEI 60333 est applicable.

NOTE Comme les photodiodes ne nécessitent que des tensions de polarisation basses ou moyennes, il est préférable d'effectuer cette mesure à l'aide d'oscilloscopes spécialement équipés pour relever les caractéristiques de diodes et de transistors. Ces appareils permettent des mesures de  $I(U)$  en continu ou en pulsé. Les mesures pulsées sont recommandées lors du relevé de la caractéristique  $I(U)$  dans la zone de claquage. Ceci est particulièrement valable pour les photodiodes à avalanche (APD).

#### 6.3.2 Variation avec la température

Le courant de fuite  $I_r$  d'une photodiode semiconductrice croît exponentiellement avec la température et, près de la température maximale de fonctionnement (généralement 60 °C), le bruit parallèle de la PD peut constituer la contribution essentielle du bruit de l'ensemble photodiode-amplificateur. De ce fait, il convient de donner la variation du courant de fuite en fonction de la température sur toute l'étendue de la gamme de température d'utilisation.

## 5.2 Window

Although windowless PDs are also available, the photodiode surface is usually covered by a protective layer (window) to prevent mechanical stress by the scintillator, scratching of the surface during manipulation or contamination by light coupling compounds.

The manufacturer shall indicate (see clause 8, data sheet) the material of the window, the refractive index of the window, and the possibility of cleaning the photodiode surface. If cleaning is allowed the precise conditions and the type of pad and solvent, which can be used to wipe off any contamination, shall be indicated.

# 6 Electrical characteristics

## 6.1 General

Measurement of the electrical characteristics of photodiodes are in most cases identical to those used for direct ionization semiconductor detectors described in IEC 60333. This is also the case for nuclear detection parameters such as energy resolution, noise and electrical resolution of a photodiode/scintillator/amplifier system, as described in IEC 60333.

## 6.2 Capacitance

The measurement method described in IEC 60333 is applicable.

The depletion layer,  $d$ , can be computed from the area,  $A$ , and the capacitance,  $C$ :

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 A / d \quad (1)$$

where

$\varepsilon_r$  is the relative permittivity of the semiconductor;

$\varepsilon_0$  is the permittivity of vacuum, and

$\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $A$ ,  $d$ ,  $C$  are expressed in the international unit system.

## 6.3 Leakage current, $I_r$ , and current – voltage characteristic, $I(U)$

### 6.3.1 Measurement

The measurement method described in IEC 60333 is applicable.

NOTE As photodiodes need only low or medium bias voltages, this measurement can preferably be carried out using specially equipped oscilloscopes for plotting the current voltage characteristics of diodes and transistors. Such equipment has provision for making d.c. or pulsed measurements of  $I(U)$ . Pulsed measurements are recommended when plotting the  $I(U)$  characteristic in the breakdown voltage region. This is particularly true for avalanche photodiodes (APDs).

### 6.3.2 Temperature dependence

The leakage current  $I_r$  of semiconductor photodiodes increases exponentially with temperature and the parallel noise of the PD may, near the maximum operating temperature (generally 60 °C), becomes the main contribution to the total noise of the photodiode/amplifier combination. Therefore, the leakage current temperature dependence should be given over the whole operating temperature range.

Le courant de fuite pour la tension nominale de fonctionnement  $U_{bn}$  doit être indiqué, au moins à la température normale et à  $T_{max}$ .

#### 6.4 Temps de montée

La méthode de mesure décrite dans la CEI 60333 est applicable.

NOTE Afin d'éviter toute confusion lorsqu'on indique un temps de montée, il convient de préciser à quel temps de montée il est fait référence:

- a) photodiode seule,
- b) détecteur à scintillation à photodiode,
- c) photodiode couplée à un amplificateur,
- d) détecteur à scintillation à photodiode couplé à un amplificateur.

#### 6.5 Préamplificateurs et amplificateurs utilisés avec des détecteurs à scintillation à photodiode

Les préamplificateurs et amplificateurs utilisés avec des photodiodes couplées à des scintillateurs pour la détection de rayonnements nucléaires sont du même type que ceux utilisés avec les détecteurs semiconducteurs.

Les méthodes de mesure décrites dans la CEI 61151 sont applicables.

#### 6.6 Mesures du bruit et de la résolution

Les méthodes de mesure décrites dans la CEI 60333 et la CEI 61151 sont applicables.

#### 6.7 Gain des photodiodes à avalanche (G)

##### 6.7.1 Généralités

Le gain d'une photodiode à avalanche (APD) est le quotient du photocourant mesuré à une tension pour laquelle il y a multiplication, par le photocourant mesuré à faible tension en l'absence de multiplication, pour une puissance optique incidente constante.

Le gain d'une APD dépend fortement de la tension de polarisation ainsi que de la température, en particulier au voisinage de la tension de claquage.

Le fabricant de l'APD doit indiquer (voir article 8 – notice technique):

- a) la tension maximale  $U_{bmax}$  (ou le gain maximal) à laquelle l'APD peut être utilisée;
- b) un relevé du gain en fonction de la tension de polarisation ou, si une tension nominale de fonctionnement  $U_{bn}$  est recommandée, la pente  $\Delta G/\Delta U$  autour de  $U_{bn}$ ;
- c) la variation du gain avec la température, au moins pour  $U_{bn}$  et  $U_{bmax}$ .

##### 6.7.2 Mesure

Afin de déterminer le gain d'une APD pour détecteur à scintillation, deux méthodes peuvent être appliquées pour mesurer le photocourant en fonction de la tension:

- a) la méthode du photocourant continu avec illumination constante, qui est une méthode générale, ou
- b) la méthode de la lumière pulsée qui utilise le système traditionnel d'amplification et d'analyse de spectrométrie nucléaire.

For the nominal bias voltage  $U_{bn}$ , the leakage current  $I_r$  shall be stated at least at normal temperature, which shall be given, and at  $T_{max}$ .

#### 6.4 Rise time

The measurement method described in IEC 60333 is applicable.

NOTE In order to avoid any confusion when a rise time is given, it should be stated which rise time is referred to:

- a) photodiode alone,
- b) photodiode scintillation detector,
- c) photodiode coupled to an amplifier,
- d) photodiode scintillation detector coupled to an amplifier.

#### 6.5 Preamplifiers and amplifiers used with photodiode scintillation detectors

Preamplifiers and amplifiers used with photodiodes coupled to scintillators for nuclear radiation detection are of the same type as those used with semiconductor detectors.

The measurement methods described in IEC 61151 are applicable.

#### 6.6 Noise and resolution measurements

The measurement methods described in IEC 60333 and IEC 61151 are applicable.

#### 6.7 Gain of avalanche photodiodes (G)

##### 6.7.1 General

The gain of an avalanche photodiode (APD) is the ratio of the photocurrent measured at a given voltage where multiplication takes place to the photocurrent measured at low voltage without multiplication, for constant incident optical power.

The gain of an APD is strongly dependent on the bias voltage and also on temperature, particularly near the breakdown voltage.

The manufacturer of the APD shall give (see clause 8 – data sheet):

- a) the maximum voltage  $U_{bmax}$  (or maximum gain) at which the APD can be operated;
- b) a plot of the gain as a function of bias voltage or, if a nominal voltage  $U_{bn}$  is recommended, the slope  $\Delta G/\Delta U$  around  $U_{bn}$ ;
- c) the dependence of the gain on the temperature, at least for  $U_{bn}$  and  $U_{bmax}$ .

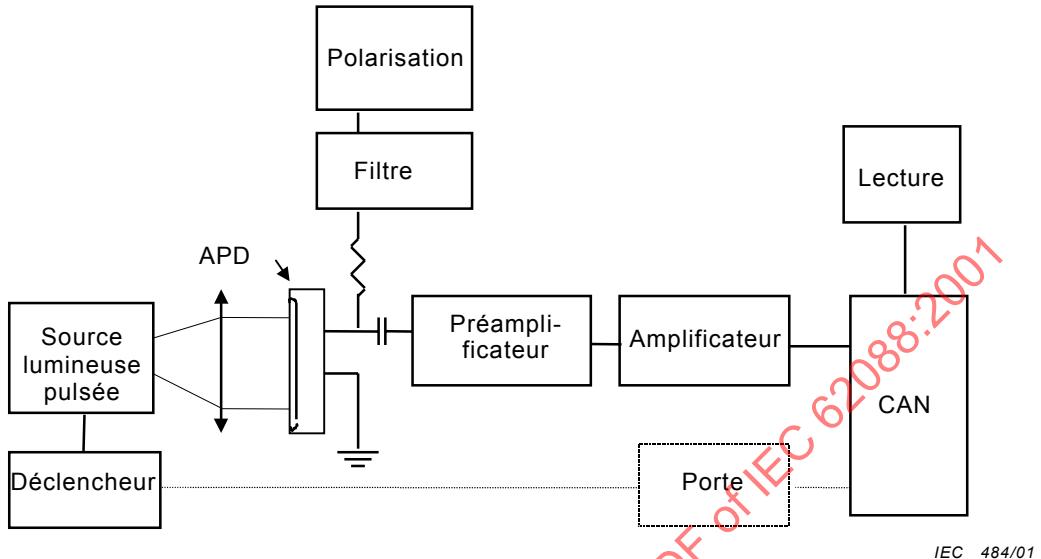
##### 6.7.2 Measurement

To determine the gain of an APD for scintillation detection two methods may be used for measuring the photocurrent as a function of voltage:

- a) the general method of measuring the d.c. photocurrent with constant illumination, or
- b) a pulsed light method, which uses the traditional nuclear spectrometry, pulse amplification and analysis system.

### 6.7.2.1 Méthode de la lumière pulsée

Le système de spectrométrie couplé à l'APD (figure 3) comprend une alimentation délivrant une tension de polarisation filtrée et de haute stabilité, un préamplificateur de charge, un amplificateur linéaire de mise en forme et un convertisseur analogique-numérique (CAN).



**Figure 3 – Schéma du montage de mesure du gain d'une APD par la méthode pulsée**

Un couplage capacitif avec le préamplificateur est conseillé pour cette mesure afin d'éviter toute variation de la composante continue avec la tension de polarisation.

La surface de la photodiode est éclairée par des impulsions brèves de lumière issues d'une source lumineuse stabilisée et déclenchée. La tache lumineuse doit couvrir l'entièr<sup>RE</sup>e surface active de l'APD pour s'assurer que la mesure est représentative de l'utilisation en comptage à scintillation.

La longueur d'onde des impulsions lumineuses doit être indiquée et doit se situer dans le domaine de longueurs d'onde où la sensibilité énergétique dépasse 50 % de son maximum (voir article 7).

Le temps de montée des impulsions lumineuses doit être inférieur à 1/10 du temps de montée du préamplificateur.

Les impulsions de signal de l'APD, amplifiées et mises en forme par le préamplificateur de charge et l'amplificateur linéaire principal, donnent des impulsions de tension proportionnelles à  $I_{ph}$ . L'amplitude des impulsions de sortie de l'amplificateur de mise en forme sont numérisées par le CAN et portées en fonction de la tension de polarisation (figure 4) sur une échelle semilogarithmique en unités arbitraires (échelle de gauche sur la figure 4).

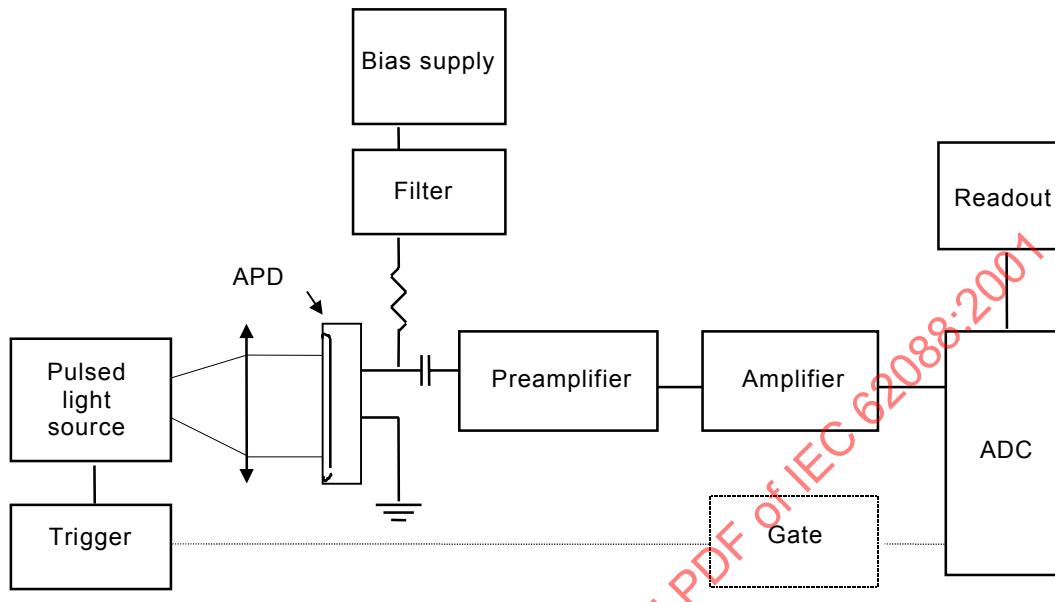
**NOTE** Certains CAN peuvent nécessiter un signal porte (ils ne sont actifs que pendant le traitement du signal). Ceci peut être réalisé aisément à l'aide du déclencheur de la source lumineuse pulsée.

La partie basse tension de cette courbe fait apparaître une partie plate horizontale (segment ab sur la figure 4) qui est le domaine de polarisation où aucune amplification n'a lieu. Un gain de 1 est attribué à cette région et on fait glisser en conséquence l'échelle semilogarithmique (échelle de droite) pour obtenir directement le gain en fonction de la polarisation.

L'intensité lumineuse incidente (puissance optique incidente) doit se situer dans la dynamique linéaire de l'APD: pour une polarisation et une température constantes, la diminution ou l'augmentation de l'intensité lumineuse d'un facteur de 10 doit diminuer ou augmenter le photocourant de l'APD du même facteur de 10.

### 6.7.2.1 Pulsed light method

The APD spectrometry system (figure 3) includes a filtered and high stability voltage bias supply, a charge preamplifier, a linear shaping amplifier and an analogue to digital converter (ADC).



IEC 484/01

**Figure 3 – Block diagram of the set-up for APD gain measurement by the pulsed method**

AC coupling to the preamplifier is recommended in this measurement to avoid d.c. changes with bias voltage.

Fast light pulses from a triggered stabilized light source are directed onto the surface of the photodiode. The light spot shall cover the entire active area of the APD to make sure that the measurement is representative of the situation encountered in scintillation counting.

The wavelength of light pulses shall be stated and shall be within the wavelength range for which the responsivity is higher than 50 % of the maximum responsivity (see clause 7).

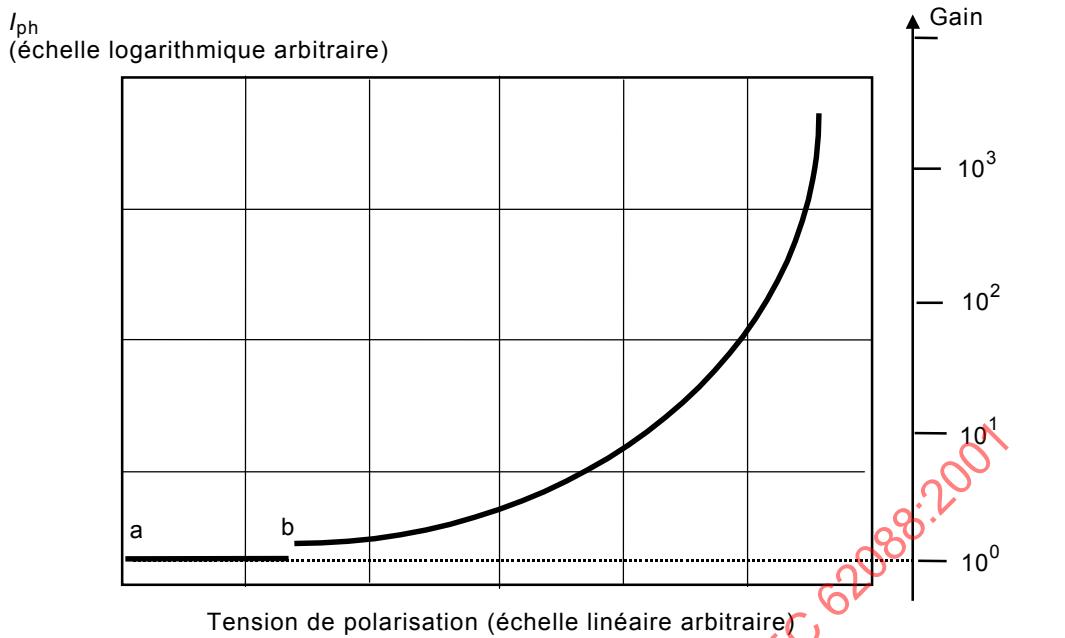
The rise time of the light pulses shall be less than 1/10 of the rise time of the preamplifier.

The signal pulses of the APD are amplified and shaped by the charge preamplifier and the main linear amplifier, giving voltage pulses proportional to  $I_{ph}$ . The pulse height of the output pulses of the shaping amplifier is digitized by the ADC and plotted as a function of bias voltage (figure 4) on a semilogarithmic scale in arbitrary units (left scale on figure 4).

**NOTE** Some ADCs may need to be gated (made receptive to incoming pulses); this can easily be done using the trigger of the pulsed light source.

The low bias voltage part of this curve shows a flat horizontal part (segment ab on figure 4) which is the bias voltage range where no amplification takes place. A gain of 1 is assigned to that region and the semilogarithmic scale is shifted accordingly (right scale) to give directly the gain versus bias voltage.

The incident light intensity (incident optical power) shall be in the linear range of the APD: for constant bias voltage and temperature, decreasing or increasing the light intensity by a factor of 10, shall decrease or increase the photocurrent of the APD by the same factor of 10.



**Figure 4 – Photocourant et gain d'une APD en fonction de la tension de polarisation**

La dynamique linéaire du système d'amplification et du CAN doivent être supérieures d'une décade à la dynamique des impulsions de sortie, donc du gain à mesurer (par exemple 4 décades pour un gain de 1 000).

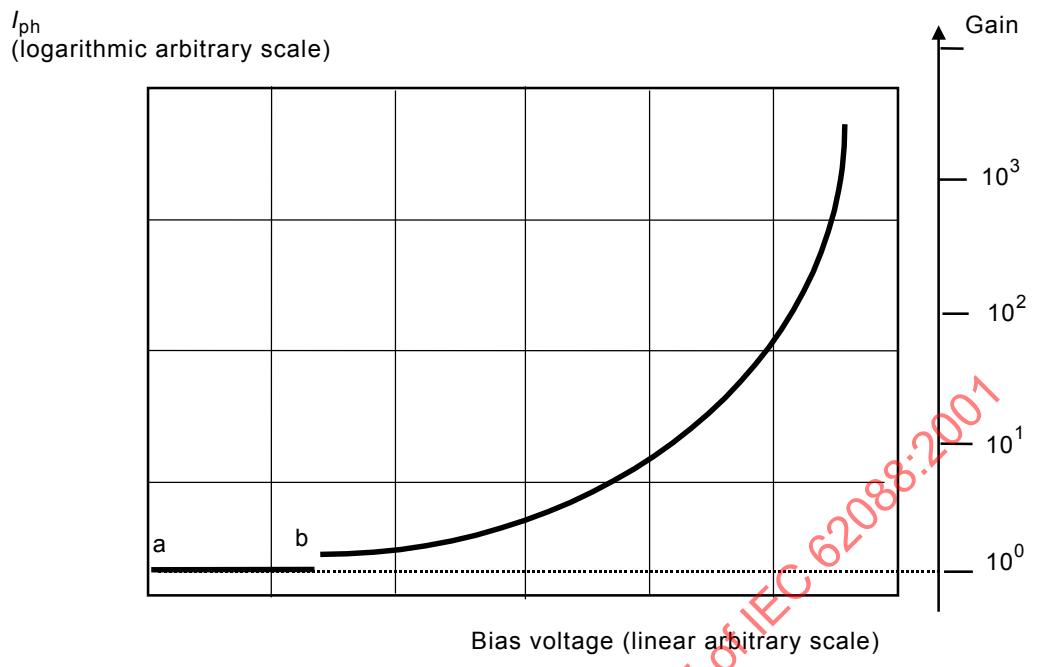
#### 6.7.2.2 Méthode du courant continu

Le système de mesure comprend une alimentation de polarisation de haute stabilité et un ampèremètre à grande dynamique en série avec l'APD (comme sur la figure 6, sauf que la PD est à remplacer par l'APD).

Comme en 6.7.2.1, le photocourant est mesuré et représenté en fonction de la tension de polarisation, pour une lumière incidente constante, et le gain est déterminé de la même manière.

La majorité des exigences de 6.7.2.1 sont également valables pour la présente méthode:

- la tache lumineuse doit couvrir l'entièvre surface active de l'APD pour s'assurer que la mesure est représentative de l'utilisation en comptage à scintillation;
- la longueur d'onde des impulsions lumineuses doit être indiquée et doit se situer dans le domaine de longueurs d'onde où la sensibilité énergétique dépasse 50 % de son maximum (voir article 7);
- l'intensité lumineuse incidente (puissance optique incidente) doit se situer dans la dynamique linéaire de l'APD: pour une polarisation et une température constantes, la diminution ou l'augmentation de l'intensité lumineuse d'un facteur de 10 doit diminuer ou augmenter le photocourant de l'APD du même facteur de 10;
- la dynamique linéaire de l'ampèremètre doit être supérieure au gain à mesurer d'au moins une décade (par exemple 4 décades pour un gain de 1 000).



**Figure 4 – Photocurrent and gain versus bias voltage for an APD**

The linearity range of the amplification system and of the ADC shall be a decade higher than the dynamic range of the output pulses, i.e. of the gain to be measured (for example 4 decades for a gain of 1 000).

#### 6.7.2.2 DC current method

The measurement system includes a highly stable bias supply and a wide dynamic range ammeter in series with the APD (as in figure 6, except that the PD should be replaced by an APD).

As in 6.7.2.1, the photocurrent is measured and plotted for constant incident light as a function of the applied bias voltage, and the gain is determined in the same way.

Most requirements of 6.7.2.1 are also valid for the present method:

- the light spot shall cover the entire active area of the APD to make sure that the measurement is representative of the situation encountered in scintillation counting;
- the wavelength of light pulses shall be stated and shall be within the wavelength range for which the responsivity is higher than 50 % of the maximum responsivity (see clause 7);
- the incident light intensity (incident optical power) shall be in the linear range of the APD: for constant bias voltage and temperature, decreasing or increasing the light intensity by a factor of 10, shall decrease or increase the photocurrent of the APD by the same factor of 10;
- the linear range of the ammeter shall be at least a decade higher than the gain to be measured (for example 4 decades for a gain of 1 000).

### 6.7.3 Variation du gain avec la température

Comme indiqué en 6.7, le gain d'une APD est extrêmement sensible à la température, en particulier lorsqu'il est élevé, quand l'APD fonctionne à une tension de polarisation proche de la tension de claquage. Cette dernière se décalant avec la température, l'APD qui est polarisée à une tension fixe peut être irrémédiablement détériorée lorsque la température croît. De ce fait, ces mesures nécessitent de grandes précautions.

Le montage utilisé pour la mesure est le même qu'en 6.7.2. Un système de chauffage et de refroidissement est ajouté afin de faire varier la température sur toute la plage de fonctionnement. Ce système (par exemple une petite étuve ou un élément chauffant couplés à un refroidisseur Peltier) n'est pas couvert par la présente norme. Il convient qu'il soit conçu avec soin afin d'éviter d'induire toute composante additionnelle de bruit sur l'ensemble APD-préamplificateur, telle que ronflement ou bruit série dus à une longueur excessive de câble entre l'APD et le préamplificateur.

En raison de cette longueur de connexion, ou lorsqu'APD et préamplificateur sont intégrés dans le même boîtier, il n'est pas toujours possible de séparer APD et préamplificateur pour cette mesure. Dans ce cas le préamplificateur est aussi chauffé et refroidi et ceci doit être signalé.

Les mesures sont effectuées en suivant la procédure décrite en 6.7.2, au moins pour les température extrêmes de la plage de fonctionnement  $T_{\max}$  et  $T_{\min}$ .

A partir des relevés de  $G$  en fonction de la tension de polarisation pour  $T_{\max}$  et de  $G$  en fonction de la tension de polarisation pour  $T_{\min}$  on détermine  $G_{T_{\max}}$  et  $G_{T_{\min}}$  pour une valeur donnée de  $U_b$ . La valeur moyenne de la variation du gain avec la température pour  $U_b$  est donnée par:

$$\frac{\Delta G}{\Delta T} = \frac{G_{T_{\max}} - G_{T_{\min}}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (\Delta G/\Delta T \text{ est exprimé en K}^{-1}) \quad (2)$$

## 7 Caractéristiques optiques

### 7.1 Généralités

Les paramètres importants pour les détecteurs à scintillation à photodiode sont l'efficacité quantique,  $\eta$ , la sensibilité énergétique,  $s$ , et la puissance équivalente de bruit ( $NEP$ ).

Ces paramètres, très dépendants de la longueur d'onde, peuvent être obtenus à partir de la mesure de la réponse spectrale.

### 7.2 Efficacité quantique ( $\eta$ )

L'efficacité quantique est le nombre de paires électron-trou créé par photon incident:

$$\eta = \frac{I_{\text{ph}}/\text{e}}{P_{\text{opt}}/\text{hv}} \quad (3)$$

où

$I_{\text{ph}}$  est le photocourant, en ampères (A);

$e$  est la charge de l'électron, en coulombs (C);

$P_{\text{opt}}$  est la puissance optique incidente, en watts (W);

$h\nu$  est l'énergie du photon, en joules (J).

### 6.7.3 Temperature dependence of the gain

As pointed out in 6.7 the gain of an APD is very sensitive to temperature, especially at high gain values when the APD is operated at a bias voltage close to the breakdown voltage. As the breakdown voltage changes with temperature variation, the APD that is operated at a fixed bias voltage may be permanently damaged when the temperature is increased. Therefore, great care should be taken when making such measurements.

The set-up used for the measurement is the same as in 6.7.2. A heating and cooling system is added to vary the temperature over the entire operating range. This system (for example, a small oven or heating device coupled to a thermoelectric cooler) is not part of the present standard. It should be carefully designed in order to avoid any noise component from being added to the APD and the preamplifier such as ripple or increased series noise due to an excessive length of the cable between APD and preamplifier.

Due to the latter problem or when APD and preamplifier are integrated in a single package, the APD and the preamplifier can not always be disassociated for this measurement. In such a case, the preamplifier is also heated or cooled and this shall be stated.

Measurements are carried out following the procedure described in 6.7.2, for at least the values  $T_{\max}$  and  $T_{\min}$  of the operating temperature range.

From the plots of  $G$  versus bias voltage for  $T_{\max}$  and  $G$  versus bias voltage for  $T_{\min}$ , the values of  $G_{T_{\max}}$  and  $G_{T_{\min}}$  are determined for a given value  $U_b$  of the bias voltage. The mean value of the gain variation with temperature for  $U_b$  is given by

$$\frac{\Delta G}{\Delta T} = \frac{G_{T_{\max}} - G_{T_{\min}}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (\Delta G/\Delta T \text{ is expressed in } K^{-1}) \quad (2)$$

## 7 Optical characteristics

### 7.1 General

The important parameters in photodiode scintillation detection are the quantum efficiency,  $\eta$ , the responsivity,  $s$ , (also called sensitivity), and the noise-equivalent power ( $NEP$ ).

These parameters, which are strongly wavelength-dependent, can be derived from the spectral response measurement.

### 7.2 Quantum efficiency ( $\eta$ )

The quantum efficiency is the number of electron-hole pairs generated per incident photon:

$$\eta = \frac{I_{\text{ph}}/e}{P_{\text{opt}}/h\nu} \quad (3)$$

where

- $I_{\text{ph}}$  is the photocurrent in amperes (A);
- $e$  is the charge of electron in coulombs (C);
- $P_{\text{opt}}$  is the incident optical power in watts (W);
- $h\nu$  is the photon energy in joules (J).

Ceci peut aussi s'exprimer par:

$$\eta = \frac{I_{\text{ph}}}{P_{\text{opt}} / h\nu} \quad (4)$$

où  $h\nu$  est donnée en électronvolts (eV).

La mesure de l'efficacité quantique est relativement complexe car elle nécessite la connaissance de la réflectivité en fonction de la longueur d'onde ainsi que de l'efficacité de collection des charges qui peut elle aussi dépendre de la longueur d'onde du fait que la pénétration des photons varie avec  $\lambda$ .

Dans le cas de l'application à la scintillation, la sensibilité énergétique est un paramètre qualitatif plus pertinent qui englobe tous ces facteurs.

### 7.3 Sensibilité énergétique (s)

La sensibilité énergétique est le quotient du photocourant par la puissance optique incidente

$$s = \frac{I_{\text{ph}}}{P_{\text{opt}}} = \frac{\eta e}{h\nu} = \frac{\eta\lambda}{1240} \quad (5)$$

où  $s$  est en ampères par watt (A/W) et  $\lambda$  est en nanomètres (nm). Les autres symboles sont définis pour l'équation 4.

### 7.4 Réponse spectrale

La réponse spectrale d'une photodiode (4.1.6) est déterminée en mesurant la sensibilité en ampères par watt en fonction de la longueur d'onde en nanomètres. Elle est représentée par la figure 5 pour une photodiode type.

La décroissance de la photoréponse sur la partie gauche de la courbe (région I) pour les courtes longueurs d'onde (hautes énergies) provient du fait que le coefficient d'absorption optique est très élevé aux courtes longueurs d'onde ( $\geq 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ) et le rayonnement est absorbé dans la zone très proche de la surface où le temps de recombinaison est très court. De ce fait, les photo-porteurs de charge s'y recombinent avant d'être collectés dans la région p-n ou p-i-n.