

Liaisons par fibres optiques :

Les photodiodes, à avalanche, au silicium

Dans le cas des liaisons par fibres optiques se situant entre 0,8 et 0,9 μm , l'utilisation, en réception, d'une photodiode à avalanche au silicium se justifie essentiellement par le faible niveau optique reçu.

Mais, pour de telles applications, en plus de la transduction, d'autres paramètres déterminent directement les performances de la liaison en terme de débit de rapport signal sur bruit.

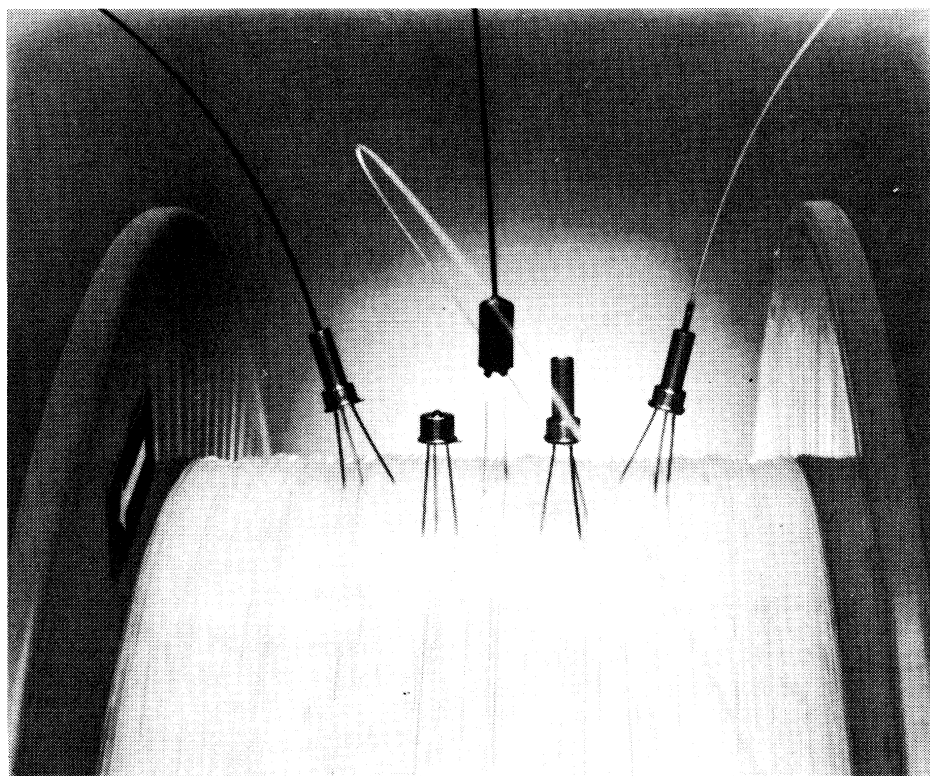
Technologie des photodiodes à avalanche

Au cours de la phase d'élaboration du cristal d'une photodiode à avalanche (PDA), il importe d'optimiser les paramètres suivants :

— l'efficacité quantique, indiquant le rapport entre le nombre de photons

incidents, sur le nombre d'électrons générés (sans multiplication interne);
— les temps de réponse, déterminant la fréquence de modulation maximale de la liaison;
— la sensibilité obtenue par multiplication interne;
— les caractéristiques de bruit du détecteur;
— le courant d'obscurité, l'homogénéité spatiale de la multiplication, la tension de claquage.

Composants d'extrémité pour transmissions par fibre optique.



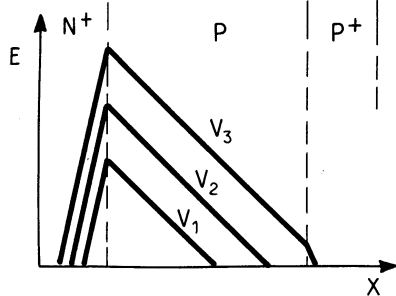
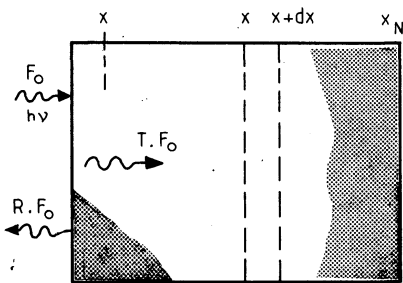


Fig. 1: Champ électrique E au sein d'une diode de type $N^+P\pi P^+$ pour différentes valeurs de tension inverse V_1, V_2, V_3 .



Réflexion —
Absorption —

$$R = 1 - \frac{4n}{(1+n)^2}$$

$$F = F_0 \exp(-\alpha \lambda x)$$

n : indice de réfraction du matériau.
 $\alpha \lambda$: coefficient d'absorption.

Fig. 2: Absorption et réflexion de surface d'une radiation lumineuse au sein d'une photodiode.

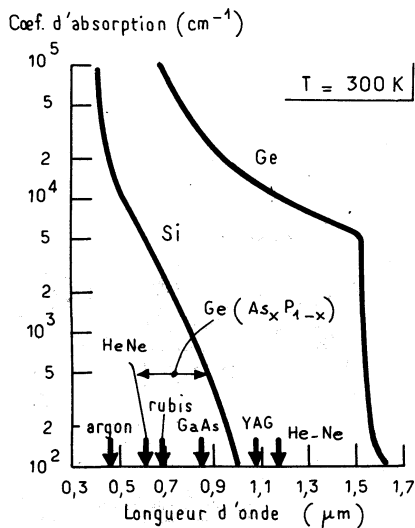


Fig. 3: Coefficients d'absorption du silicium et du germanium dans le visible et le proche infrarouge.

A ce propos, rappelons que, lorsqu'une tension inverse est appliquée aux bornes d'une diode à semiconducteur, un champ électrique E apparaît au sein de la jonction P-N, créant une zone désertée (fig. 1). Un photon, possédant une énergie supérieure à celle de la bande interdite, peut être absorbé et donner naissance à une paire électron-trou.

Cette paire électron-trou, de par la présence du champ E , est dissociée; un photocourant apparaît aux bornes du dispositif.

Dans le cas d'une photodiode à avalanche, les porteurs libres acquièrent une telle énergie cinétique, qu'ils ionisent les atomes du réseau et donnent naissance à une autre paire électron-trou; d'où l'effet avalanche.

Une photodiode à avalanche est donc un photorécepteur avec une amplification interne et peut être considérée comme un photomultiplicateur à l'état solide.

La structure du cristal de la PDA dépend intrinsèquement des performances que l'on cherche à atteindre pour le composant fini. Pour l'élaboration de la structure, un certain nombre de paramètres sont à prendre en considération.

Efficacité quantique

L'efficacité quantique est principalement déterminée par le coefficient d'absorption de la lumière incidente et par la longueur du chemin lumineux dans le matériau de la photodiode. L'intensité de la radiation décroît exponentiellement le long de ce chemin (fig. 2).

Pour des émissions dans le proche infrarouge ($0,8 \mu\text{m} - 0,9 \mu\text{m}$) l'énergie d'un photon n'étant que très peu supérieure au «gap» du silicium, l'absorption reste faible (fig. 3).

A 900 nm , le coefficient d'absorption du silicium n'est que de 400 cm^{-1} ; il ne reste plus que $1/e$ de l'énergie initiale à une distance de $25 \mu\text{m}$. L'efficacité quantique est optimale pour une profondeur de la zone active de l'ordre de $25 \mu\text{m}$.

Temps de réponse

Plusieurs phénomènes au sein d'une structure contribuent à augmenter les temps de réponse:

- le phénomène de multiplication ne s'effectue pas aussi rapidement que

souhaité. Les porteurs libres n'acquiescent pas immédiatement l'énergie suffisante à une ionisation;

- les porteurs générés au-delà de la zone désertée, la rejoignent par diffusion et sont responsables des problèmes de traînée («tailing»).

A ces phénomènes viennent s'ajouter le temps de traversée des porteurs dans la zone désertée.

Il est possible de minimiser la contribution, sur les temps de réponse des deux premiers problèmes, en diminuant la zone de multiplication et en y faisant régner un champ très élevé.

De plus, en dopant fortement les couches se situant à proximité de la zone désertée, et donc en diminuant la durée de vie des porteurs au sein de celles-ci, on minimise le phénomène de diffusion.

Un champ électrique d'une valeur supérieure à 40 kV/cm et une profondeur de la zone désertée de $25 \mu\text{m}$, permettent d'obtenir pour le dispositif final des temps de réponse de $0,25 \text{ ns}$, temps compatibles avec la plupart des applications de transmissions par fibre optique à haut débit.

Caractéristiques de bruit

La génération de paires électron-trou, par l'absorption de photons, ainsi que le principe de multiplication sont des phénomènes statistiques. Il n'est donc pas étonnant que le bruit joue un rôle important dans une PDA et qu'il convienne d'élaborer des structures optimisant ce paramètre.

Pour une distribution de champ électrique donnée au sein de la diode, les électrons et les trous possédant des propriétés différentes, un meilleur rapport signal sur bruit est obtenu lorsque la population d'électrons est plus importante que celle des trous dans la région de multiplication (en raison de la très grande différence des coefficients de ionisation des électrons et des trous).

Ceci impose donc, pour la structure du cristal, de placer la région désertée, qui n'appartient pas à la région de multiplication, d'un seul côté de celle-ci, et de réaliser cette région déplétée à l'aide d'un matériau de type P.

La puissance de bruit d'une diode de cette nature est proportionnelle à $2 M^2 + kM^3$:

- k étant le rapport des trous et des électrons en mode avalanche ($k < 1$),

— M étant le facteur de multiplication ($M > 1$).

Cette puissance de bruit est composée pour l'essentiel d'une puissance de bruit de « grenaille » de détection, et d'une puissance de bruit d'amplification interne.

Il est possible de réaliser des photodiodes présentant un facteur de bruit effectif $k \approx 0,01$ et un facteur de multiplication $M = 200$ sans que le bruit d'amplification interne ne dépasse le bruit de détection.

Paramètres complémentaires

D'autres paramètres doivent être considérés dans la définition de la structure du cristal.

Il faut minimiser les courants d'obscurité et de fuite afin de diminuer le seuil de puissance lumineuse détectable. Il est également nécessaire d'obtenir une bonne homogénéité spatiale de la sensibilité.

En première approximation, le facteur de multiplication M s'exprime en fonction de la concentration de dopant n_d par :

$$\frac{1}{M} \frac{dM}{M} = \frac{dn_d}{n_d}$$

Pour un gain de 100, une variation inférieure à 10 % de M impose une variation de concentration de dopant, sur la surface de la diode, inférieure à 0,1 %.

De plus, afin de faciliter la mise en œuvre du composant, il serait souhaitable de polariser la PDA sous une tension inverse inférieure à 200 V.

Une structure de type $N^+ P P^+$ possédant une région désertée de $25 \mu\text{m}$ nécessite une tension supérieure. Il convient donc de substituer à la couche P une couche très faiblement dopée (π) et une fine couche P , comme le montre la figure 4.

La structure finale optimisant l'ensemble des paramètres d'une PDA est alors de type $N^+ P^\pi P^+$.

Remarques : une structure complémentaire de type $P^+ N^\pi N^+$ ne satisfait pas les exigences de bruit mentionnées précédemment.

Technologie de réalisation du cristal

La figure 5 présente la coupe du cristal à avalanche de structure $N^+ P^\pi P^+$.

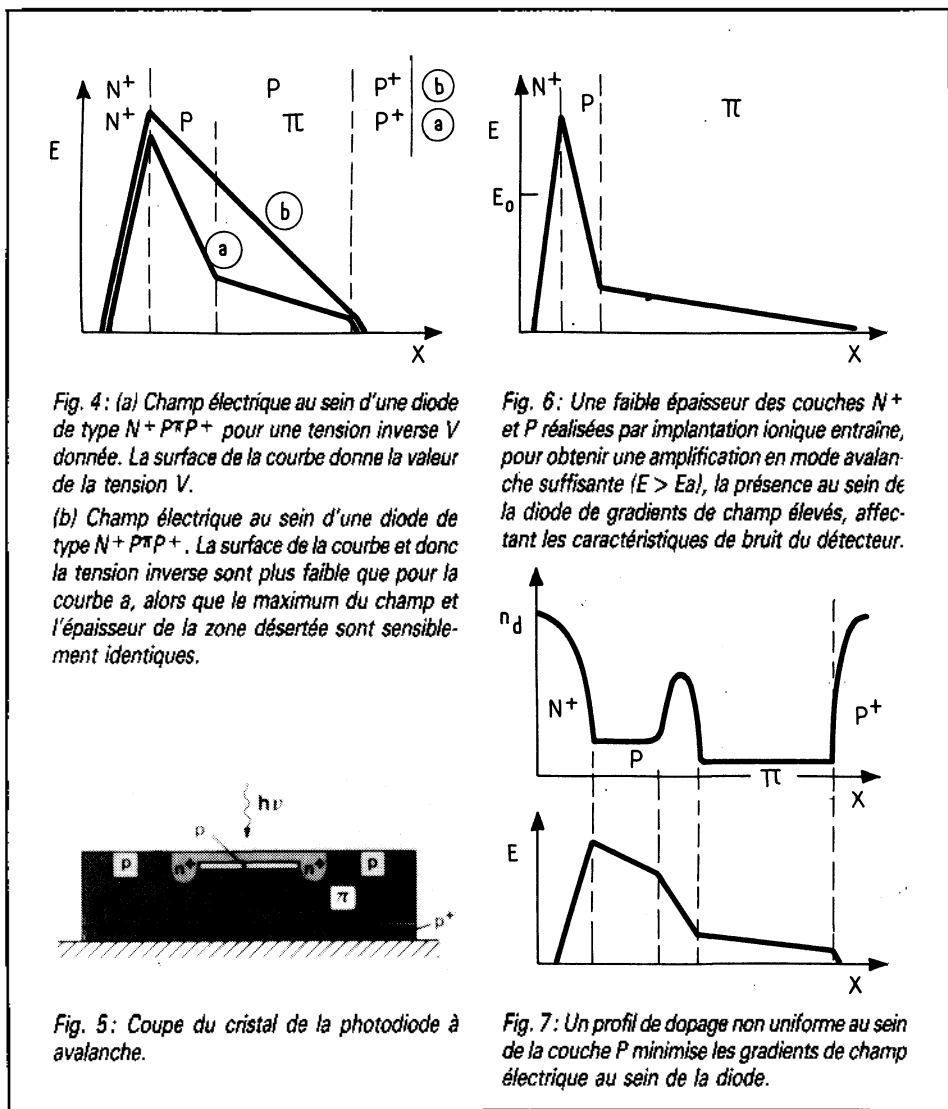


Fig. 4: (a) Champ électrique au sein d'une diode de type $N^+ P P^+$ pour une tension inverse V donnée. La surface de la courbe donne la valeur de la tension V .

(b) Champ électrique au sein d'une diode de type $N^+ P P^+$. La surface de la courbe et donc la tension inverse sont plus faible que pour la courbe a, alors que le maximum du champ et l'épaisseur de la zone désertée sont sensiblement identiques.

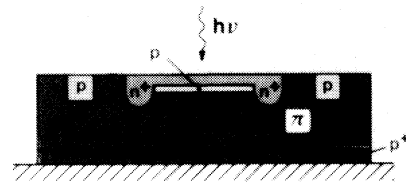


Fig. 5: Coupe du cristal de la photodiode à avalanche.

Sur un substrat de type P^+ et d'orientation $<100>$ est déposée une couche épitaxiale de type π d'une épaisseur de $25 \mu\text{m}$, possédant une résistivité de 50 à $200 \Omega/\text{cm}$.

La couche de type N^+ d'une épaisseur de $0,2 \mu\text{m}$ ainsi que la couche de type P sont obtenues par implantation ionique. L'épaisseur de la couche P est déterminée par l'énergie des implanteurs ioniques industriels et donc limitée à $1,5 \mu\text{m}$.

Cette faible épaisseur a pour conséquence de générer au sein de la diode des gradients de champ très élevés et donc d'affecter les caractéristiques de bruit (fig. 6). En utilisant un profil de dopage non uniforme au sein de la couche P (fig. 7), on minimise les valeurs de ces gradients et ce sans changer la profondeur d'implantation.

Afin d'éviter la présence de champ électrique en bordure de la surface sensible et donc d'obtenir un « profil de claquage » bien marqué, la couche N^+ est entourée d'un anneau de garde de faible épaisseur et de même

Fig. 6: Une faible épaisseur des couches N^+ et P réalisées par implantation ionique entraîne, pour obtenir une amplification en mode avalanche suffisante ($E > E_a$), la présence au sein de la diode de gradients de champ élevés, affectant les caractéristiques de bruit du détecteur.

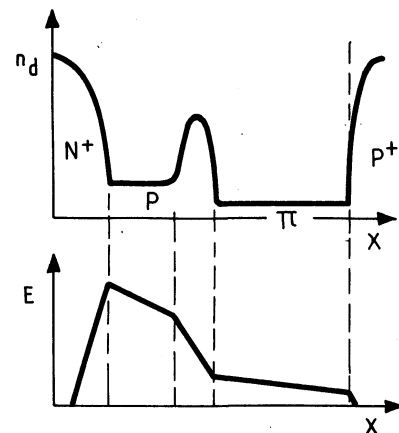


Fig. 7: Un profil de dopage non uniforme au sein de la couche P minimise les gradients de champ électrique au sein de la diode.

nature. De plus, la couche π est passivée en surface à l'aide d'oxyde de silicium pour diminuer les courants de fuite. Enfin, un dernier anneau de garde de type P délimite les zones de conduction.

Le cristal ainsi réalisé présente une surface totale de $1,4 \text{ mm}^2$ et un diamètre de surface sensible de $350 \mu\text{m}$.

Technologies de montage des photodiodes à avalanche

R.T.C. propose deux technologies de montage, l'une pour un composant à élément de fibre (fig. 8), l'autre pour un composant à microlentille.

Composant à élément de fibre

La figure 9 présente la coupe du détecteur à élément de fibre amorce $50/125 \mu\text{m}$ ou $100/140 \mu\text{m}$ (réf. RTC BPF 10 - BPF 11).

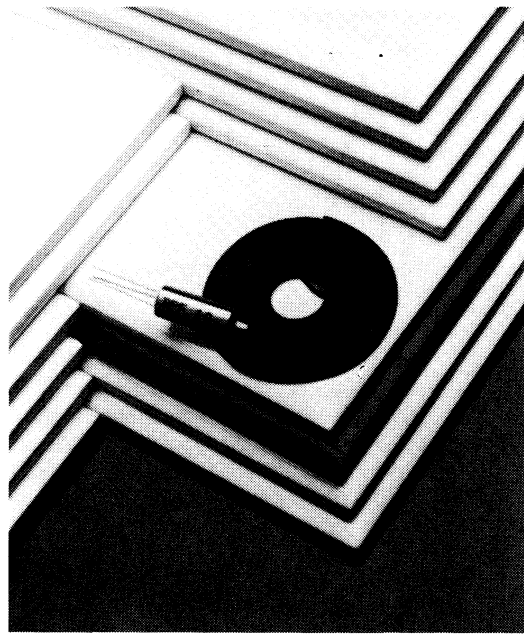


Fig. 8: Photodiode à avalanche à élément de fibre 50/125 μm (réf. BPF 10).

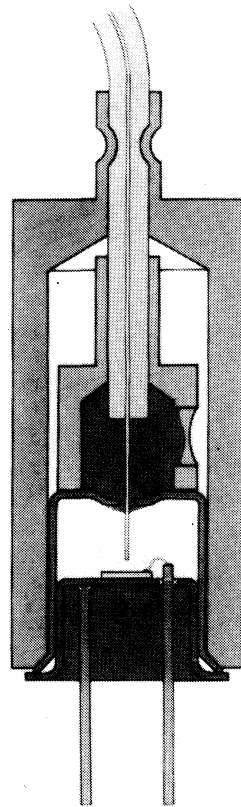


Fig. 9: Coupe du composant à élément de fibre 50/125 μm réf. BPF 10. ou 100/140 μm réf. BPF 11. ▶

Dans cette configuration, le cristal est placé sur une embase T018. Un capot dont est solidaire la fibre optique, grâce à un scellement céramique à haute température, est rapporté sur l'embase de manière rendre hermétique la cavité contenant le cristal.

Le scellement de la fibre impose pour cette dernière de posséder un revêtement primaire en polyamide-imide de 5 μm d'épaisseur.

La surface sensible du récepteur permet de s'affranchir de tout positionnement dynamique avec la fibre. Une gaine de protection de type lache, placée au sein d'une ferrule, est ramenée sur la fibre. Enfin, un capot de protection encapsule le tout.

Composant à microlentille

Pour ce composant (RTC 368 BPY/M), le cristal est monté sur une embase de type T046 comportant une dalle de céramique. Un capot métallique dans lequel une lentille de verre est scellée est ensuite soudé sur cet ensemble.

Cette optique de verre est une lentille biconvexe d'ouverture numérique compatible avec l'ouverture numérique des fibres couramment utilisées ($\text{ON} = 0,2$).

Caractéristiques électriques et optiques des photodiodes à avalanche

Les céramiques électro-optiques des photodiodes à avalanche (BPF 10 - BPF 11 et 368 BPY/M) dépendent des conditions de mesure (température) et du choix sur les valeurs de certains paramètres (courant inverse...).

Caractéristiques électriques

Tension de claquage $V_{(BR)R}$
Les valeurs minimale et maximale de la tension de claquage sont spécifiées pour un courant inverse d'obscurité et une température ambiante donnés: voir tableau 2

Courant inverse d'obscurité $I_{R(O)}$

De la même façon, la valeur maximale du courant inverse d'obscurité (fig. 9) est déterminée pour une température donnée et pour une tension normalisée par rapport à la tension de claquage:

$V_{(BR)R}$ est elle-même définie à 25 °C pour un courant inverse de 10 μA .

Capacité C

La figure 11 présente la capacité totale du composant en fonction de la tension inverse. Elle montre clairement que cette capacité reste inférieure à 1,5 pF après la tension d'amorçage ($V_{\text{Reach Through}} = 140 \text{ V}$).

Caractéristiques optiques

Sensibilité spectrale

La sensibilité spectrale d'une photodiode à avalanche est difficile à mesurer. Généralement, on utilise pour ce faire une photodiode de type PIN ($M = 1$) réalisée suivant le même procédé technologique.

On obtient ainsi une courbe normalisée (fig. 12) de la sensibilité:

- sensibilité à 800 nm pour une puissance optique de 1 μW ;
 $S_\lambda = 0,58 \text{ A/W}$
- sensibilité à 900 nm pour une puissance optique de 1 μW ;
 $S_\lambda = 0,42 \text{ A/W}$

Facteur de multiplication

Dans la phase de conception de la liaison optique, il est préférable de définir une sensibilité, ou un courant pho-

$V_{(BR)R}$ à I_R		$T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_a = 60 \text{ }^\circ\text{C}$
		1 μA	155 - 245 V
10 μA		165 - 245 V	184 - 271 V
100 μA		165 - 260 V	184 - 287 V

$I_{R(O)}$ à $V_R =$		$T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	T_a
		0,7 $V_{(BR)R}$	22 nA
0,8 $V_{(BR)R}$		26 nA	260 nA
0,9 $V_{(BR)R}$		30 nA	300 nA

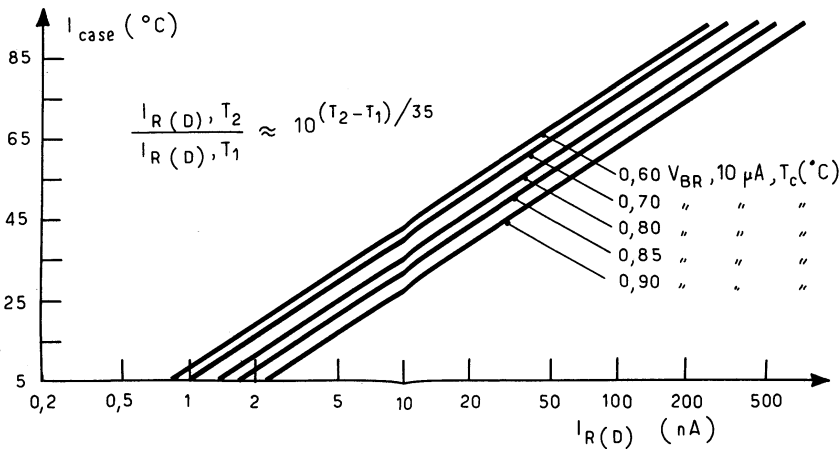


Fig. 10 : Influence de la température du boîtier (T_c) sur le courant inverse d'obscurité, pour différentes valeurs de tension normalisée par rapport à la tension de claquage (valeurs typiques).

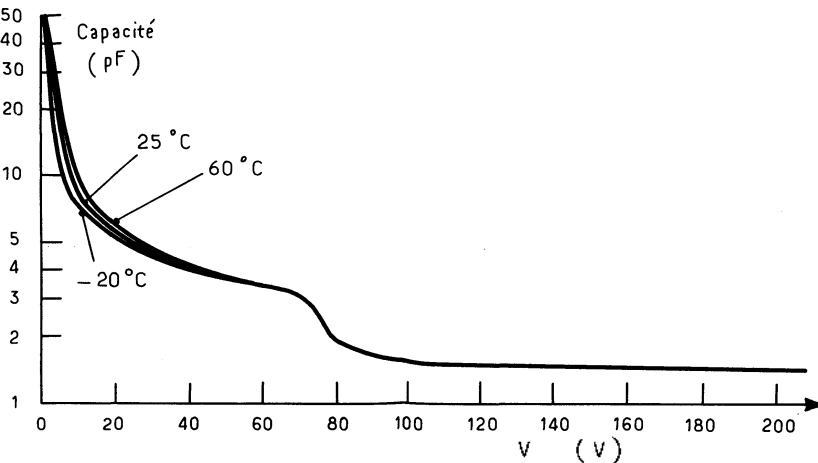


Fig. 11 : Capacité totale en fonction de la tension inverse pour différentes valeurs de température de boîtier -20°C , $+25^\circ\text{C}$, $+60^\circ\text{C}$. La capacité totale est inférieure à $1,5\text{ pF}$ après la tension d'amorçage ($V = 140\text{ V}$).

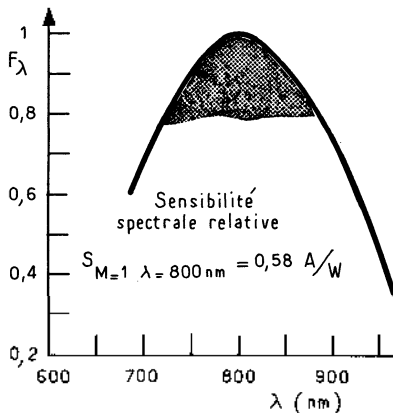


Fig. 12 : Sensibilité spectrale relative; $S_M = 1$, $\lambda = 800\text{ nm}$, $= 0,58\text{ A/W}$.

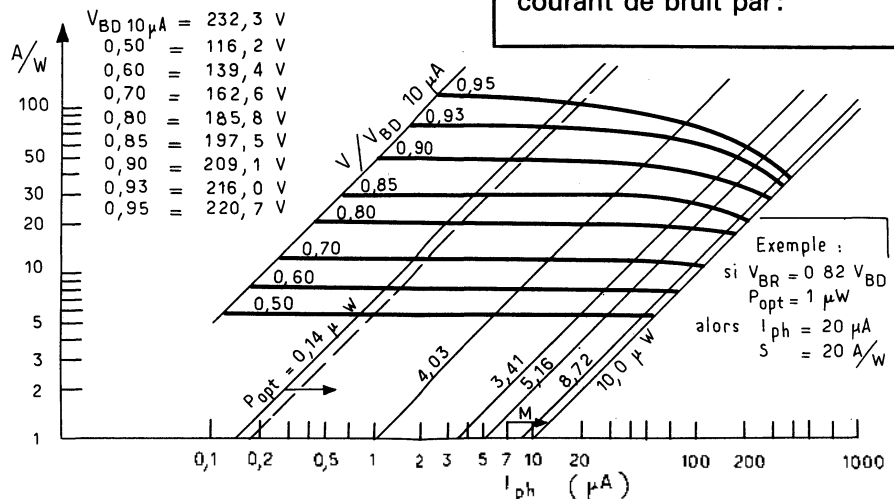


Fig. 13 : Courant photodétecté (I_{ph}) et sensibilité en fonction de la puissance optique reçue ($P_{opt} = 0,14\text{ }\mu\text{W}$ à $P_{opt} = 10\text{ }\mu\text{W}$) pour différentes valeurs de tension inverse ($V_{BR} = 0,5 V_{BD}$ à $V_{BR} = 0,95 V_{BD}$). La tension de claquage V_{BD} est définie à $10\text{ }\mu\text{A}$ et à $T_a = 25^\circ\text{C}$. La longueur d'onde d'émission est $\lambda = 780\text{ nm}$.

totodétecté, pour une puissance optique reçue, plutôt qu'un facteur de multiplication.

Il est donc souhaitable de caractériser la sensibilité du composant par une valeur de courant photodétecté pour différentes valeurs de puissance optique reçue. Mais cette sensibilité dépend de la tension appliquée.

Comme la tension de claquage s'étend dans une plage importante (165 V à 245 V pour $I_R = 10\text{ }\mu\text{A}$ à 25°C), il n'est pas possible de définir une sensibilité pour une tension fixée.

Par contre, on peut définir cette sensibilité pour une tension normalisée par rapport à la tension de claquage, elle-même spécifiée pour des conditions données (I_R et T°).

Courant photodétecté I_p minimal (fig. 13)

$V_{(BR)R}$ est mesurée pour $I_R = 10\text{ }\mu\text{A}$ et à 25°C

Caractéristiques de bruit

Plusieurs paramètres permettent d'évaluer les caractéristiques de bruit des PDA.

On définit tout d'abord le facteur de bruit F qui est le rapport du bruit actuel à celui qui existerait si toutes les paires générées étaient exactement multipliées par le facteur de multiplication M :

$$F = 2 + kM - \frac{1}{M} 2 + kM$$

$$(M \gg 1 \text{ et } M < 120)$$

k étant le facteur de bruit effectif, c'est-à-dire le rapport des trous et des électrons en mode avalanche.

On définit ensuite le carré moyen du courant de bruit par:

$$I_n = 2 qB (M^2 F (I_B + I_{ph}) + I_s)$$

avec: q: charge de l'électron

B: bande passante

I_b : courant d'obscurité non multiplié

I_{ph} : courant photonique non multiplié

I_s : courant d'obscurité de surface

A partir de ce courant de bruit est enfin déterminée la puissance équivalente de bruit (PEB):

$$PEB = \frac{\text{courant de bruit (sans signal optique)}}{\text{sensibilité}}$$

Les ordres de grandeur pour ces paramètres sont les suivants:

k ($M \gg 1$ et $M < 120$)

F ($M = 50$)

PEB ($M = 50$ $\lambda = 800$ nm $k = 0,02$) = $7,6 \cdot 10^{-15}$ W/ $\sqrt{\text{Hz}}$.

= 0,02

= 3

	$P_{opt} = 0,1 \mu W$	λ nm	$P_{opt} = 10 \mu W$	λ nm
I_{ph} à 0,7 $V_{(BR)R}$	min 0,9 μA	780	min 75 μA	780
	0,7 $V_{(BR)R}$	820	min 75 μA	820
	0,7 $V_{(BR)R}$	850	min 71 μA	850
I_{ph} à 0,85 $V_{(BR)R}$	min 2,5 μA	780	min 170 μA	780
	0,85 $V_{(BR)R}$	820	min 170 μA	820
	0,85 $V_{(BR)R}$	850	min 161 μA	850

ces (plusieurs kilomètres) et à haut débit, les photodiodes à avalanche R.T.C. sont tout particulièrement bien adaptées.

La structure $N^+ P^+ P^+$ du cristal de la PDA réalisée par épitaxie et implan-

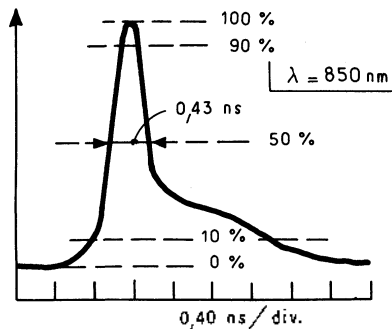


Fig. 14: Phénomène de traînée lorsque la région π n'est pas totalement désertée.

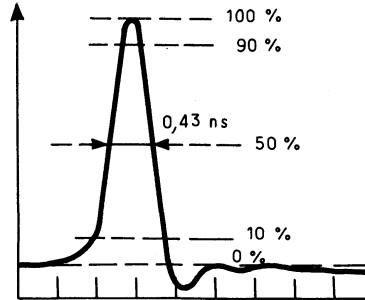


Fig. 15: Réponse d'une PDA à un dirac, le temps de réponse à mi hauteur est de 0,44 ns.

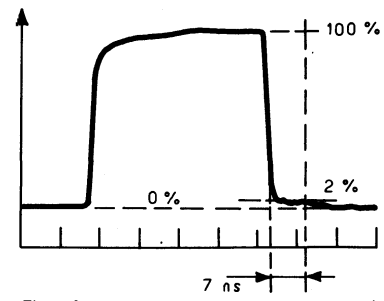


Fig. 16: Réponse d'une PDA à une impulsion.

Tableau I: Performances des photodiodes à avalanche R.T.C.

Photodiode à avalanche à élément de fibre										
Type	Valeurs à ne pas dépasser		Caractéristiques					Fibre		Boîtier (à élément de fibre)
	P_{tot} (mW)	I_F (mA)	$V_{(BR)R}$ (V)	$V_{(RT)R}$ (V)	S_A (A/W)	$I_{R(D)}$ (nA)	NEP (fW/H ^{1/2})	ϕ_c/ϕ_B ($\mu m/\mu m$)	O.N.	
BPF 10	100	10	200	140	60	5	7,6	50/125 GI	0,2	TO18
BPF 11	100	10	200	140	60	5	7,6	100/140 SI	0,24	TO18

Photodiode à avalanche en boîtier hermétique à microlentille									
Type	Valeurs à ne pas dépasser		Caractéristiques					Boîtier (TO 46 μL)	
	P_{tot} (mW)	I_F (mA)	$V_{(BR)R}$ (V)	$V_{(RT)R}$ (V)	S_A (A/W)	$I_{R(D)}$ (nA)	NEP (fW/H ^{1/2})		
368 BPY/M	100	10	200	140	60	5	7,6	FO 101	

GI = fibre à gradient d'indice - M.O. = fibre monomode - μL = microlentille

Temps de réponse

Lorsque la tension inverse aux bornes du dispositif ne dépasse pas quelques dizaines de volts, la zone désertée est très étroite et la région π est soumise à aucun champ électrique. Les porteurs générés au sein de cette couche intrinsèque rejoignent la zone désertée par diffusion et sont donc responsables des phénomènes de traînée (fig. 14). Par contre, si la zone π est complètement désertée, les por-

teurs acquièrent « immédiatement » leur vitesse de déplacement. Les figures 15 et 16 font état des temps de réponse inférieurs à 0,5 ns (temps de réponse à mi-hauteur).

Conclusion

Pour des applications de transmissions par fibre optique dans la première fenêtre sur de grandes distan-

tation ionique ainsi que les technologies de montage du produit offrent un bon compromis entre les performances (faible bruit, grande sensibilité, faible temps de réponse) et une industrialisation facile du composant.

Le tableau I résume l'ensemble des performances des photodiodes à avalanche R.T.C.

Th. SENS
Ingénieur R.T.C.