

Caractérisations électriques d'un SiPM et d'une APD-Geiger pour de futures applications en imagerie haute sensibilité

Khalil JRADI¹
Université Paul Sabatier
¹Laboratoire CESR – UMR 5187
9, Av du Colonel Roche
31028 Toulouse

Denis PELLION¹, Arnaud LE PADELLEC¹,
Daniel ESTEVE², A. Robert BAZER-BACHI¹
²Laboratoire LAAS – UPR 8001
7, Av du Colonel Roche
31077 Toulouse Cedex 4

Email : kjradi@laas.fr

Résumé

De nos jours, il existe deux dispositifs pour détecter les faibles flux lumineux: les Photomultiplicateurs –PM- et les Photodiodes à avalanche polarisées en mode Geiger –APD – Geiger-.

Le PM est un détecteur conçu dans les années 70 qui présente certes de nombreux avantages mais qui souffre également d'inconvénients comme sa taille, son coût, son poids ou sa sensibilité aux champs magnétiques.

Les APD - Geiger sont elles conçues pour la détection des très faibles flux lumineux ; on parle alors de nano luminosités. Ces photodiodes présentent de nombreux avantages par rapport aux photomultiplicateurs, avec de nombreuses applications et notamment en astrophysique avec la détection de flashes Cherenkov.

Le travail présenté ici consiste en l'étude, la conception et la réalisation d'une matrice de pixels à haute sensibilité pour des domaines applicatifs tels que les observations spatiales, l'imagerie médicale ou encore la biologie.

1. Introduction

Cet article concerne l'étude d'une 'Avalanche Photodiode' - Geiger qui est un dispositif à semi-conducteur composé d'une jonction PN intégrée dans une technologie spéciale pour la détection de très faible flux lumineux. Ce nouveau dispositif, qui commence à peine à être industrialisé et commercialisé [1], a fait ses preuves par rapport au PM dans le domaine de la détection de la lumière. Ce dernier est un dispositif utilisé depuis des années, mais qui présente des inconvénients : de pixellisation, de poids, de coût, d'adressage,... Par conséquent, la miniaturisation de l'APD-Geiger est une sérieuse alternative au PM, surtout dans des applications basées sur l'imagerie. Différents modèles physiques et électriques [2-3], considérés comme indispensables aux démarches d'optimisation technologiques ainsi qu'au développement des circuits de commande et de lecture, i.e. la base de toute technologie d'imagerie, ont été précédemment mis au point. Les APD - Geiger sont actuellement les seuls dispositifs existants à base de semi-conducteurs pour la détection de faible flux lumineux, et

ceci grâce à leur polarisation au delà de la tension d'avalanche (V_{br}) [4] et à leur protection par une résistance de grande amplitude, appelée 'Résistance de Quenching'. Sur le principe, les APD - Geiger présentent un gain photo-électronique G très élevé, pouvant atteindre quelques 10^8 e^- /photon. En pratique, ce gain dépend très fortement, de la température, de la tension de polarisation au delà de l'avalanche ainsi que d'autres paramètres comme la capacité interne C ou la résistance de 'Quenching' R_q .

2. La détection des photons

Le circuit de polarisation présenté figure 1, permet l'obtention du régime Geiger, et donc la détection de très faible flux lumineux.

Dans ce circuit, on définit la résistance R_q comme étant la résistance protectrice de l'APD - Geiger. Cette résistance permet d'éteindre l'avalanche lorsqu'un photon est absorbé par la zone de charge d'espace, i.e. la région de multiplication. Une tension de polarisation 10 à 20 % supérieure à la tension de claquage V_{br} doit être appliquée en inverse aux bornes de l'APD-Geiger.

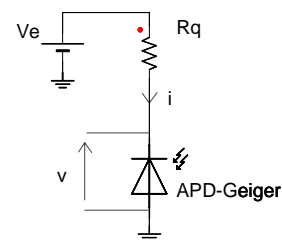


Figure 1. Le circuit électrique utilisé pour la détection de photons.

Ce genre de circuit électrique est considéré comme un circuit de 'Quenching' passif tandis que d'autres circuits de polarisation dits de 'Quenching' actif existent et comportent des transistors de type MOS. L'utilisation de ces derniers a pour but d'augmenter la rapidité de détection, mais également d'optimiser l'encombrement pour une intégration avec l'APD - Geiger sur la même puce. Ce type de circuits ne sera pas traité dans l'article.

3. Vers l'imagerie

Bien qu'une APD - Geiger présente une surface de détection très faible par rapport à celle d'un PM, une solution a été proposée [5] qui consiste à les regrouper en matrice pour constituer ce qu'on appelle un Silicium Photomultiplicateur –SiPM- (voir figure 2). La surface de détection s'en trouve optimisée, mais malheureusement le détecteur souffre de davantage de bruit qui est proportionnel aux nombres d'APD - Geiger. Pour s'affranchir de ce problème majeur, un refroidissement du composant s'est avéré nécessaire, et le bruit est divisé d'un facteur 2 tous les 8 °C [6].

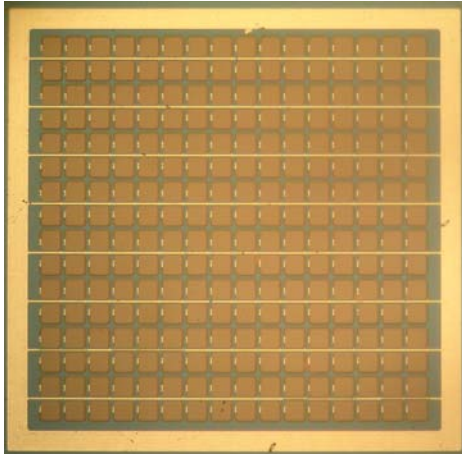


Figure 2. Un SiPM 16x16 APD-Geiger carré

Dans la course à l'imagerie, plusieurs idées ont été proposées [7], mais la conception technologique varie en fonction du traitement électronique du signal mais aussi des étapes de fabrication.

Dans notre travail, nous avons envisagé deux possibilités :

1. l'imagerie à base de SiPM. Ce système traite les pixels de l'imageur utilisé, en faisant une collection de photons détectés et en les adressant vers chaque sortie d'un SiPM (figure 3).
2. l'imagerie à base d'APD - Geiger. Chaque pixel élémentaire (APD - Geiger toute seule) est traité séparément. L'adressage de pixels se fait sur la face avant de la puce, tandis que la détection du flux se fait sur la face arrière (figure 5).

Ces deux systèmes avec leurs circuits de commande et d'adressage constituent la base de la future imagerie Geiger.

3.1 Imageur SiPM

Ce système de détection présente davantage de performances que celles de l'autre système précité. Dans ce cas, le nombre des pixels est beaucoup plus important, mais la taille l'est tout autant. Celle de l'APD - Geiger pour des dispositifs ronds doit être dans une gamme de 10 à 20 μm de diamètre. Le pixel élémentaire –le SiPM- est alors une matrice d'APD - Geiger (exemple 8x8 ou 20x20), et tous les pixels sont accessibles à tout moment.

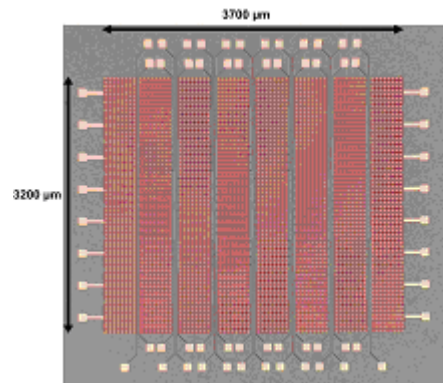


Figure 3. Un imageur à base de SiPM (8x8).

3.2 Imageur APD-Geiger

Ces imageurs sont basés sur des pixels élémentaires d'APD - Geiger. Chacune des photodiodes constitue un pixel. Le pilotage du système n'est pas différent du précédent, mais le traitement de signaux issus de chaque pixel est –en revanche- plus délicat. Le bruit qui intervient dans ce mode de traitement est difficile à filtrer sauf à mettre à profit les coïncidences entre pixels voisins, ce qui réduit fortement le bruit mais malheureusement également les sensibilité et finesse de l'imageur.

Dans ce type d'imagerie, deux montages différents sont possibles dont l'un a été réalisé lors d'un processus technologique effectué en salle blanche du LAAS. Le premier montage se base sur l'utilisation de deux résistances de 'Quenching' par photodiode, voir l'illustration sur la figure 4.

Le deuxième montage consiste à utiliser les deux faces de la puce. La face arrière est amincie et implantée type P⁺⁺ pour pouvoir détecter les photons. La face avant joue le rôle de surface de contact avec le circuit électronique du traitement de signaux, un circuit FPGA, à travers bien sûr d'une couche de connectique BGA, comme l'illustre la figure 5.

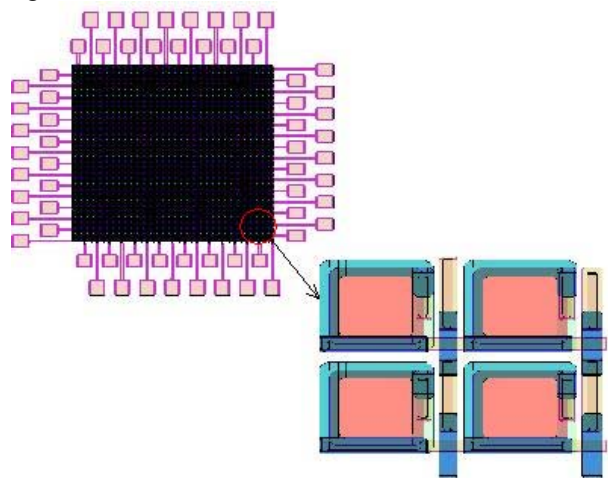


Figure 4. Un imageur à base d'APD-Geiger (32x32).

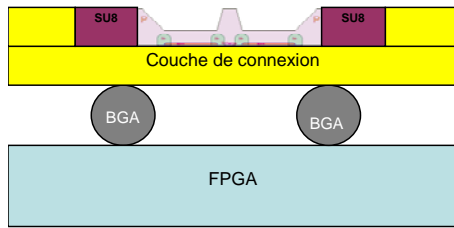


Figure 5. La technologie d'un Imageur APD-Geiger par transfert de bit.

4. Résultats et interprétations

Jusqu'à maintenant, les mesures effectuées donnent les caractéristiques des APD - Geiger dans le noir. La figure 6 présente le 'Dark Count Rate' en fonction de la tension de polarisation, et les courbes présentées mettent en exergue l'importance de valider l'élément unitaire comme constituant d'un imageur à haute sensibilité.

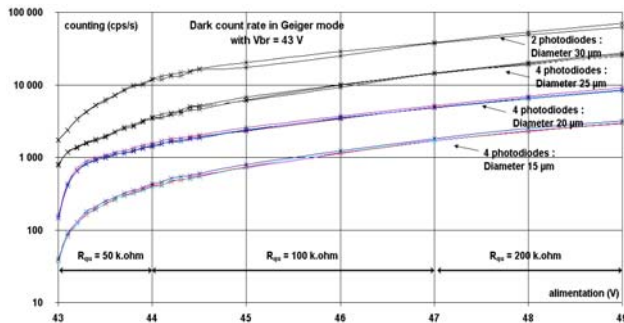


Figure 6. Comptage des impulsions thermiques expérimentales, pour 4 types de photodiodes de différents diamètres.

Les courbes de variation de 'Dark Count Rate' en fonction de la tension d'alimentation, à différentes températures sont également montrées figure 7.

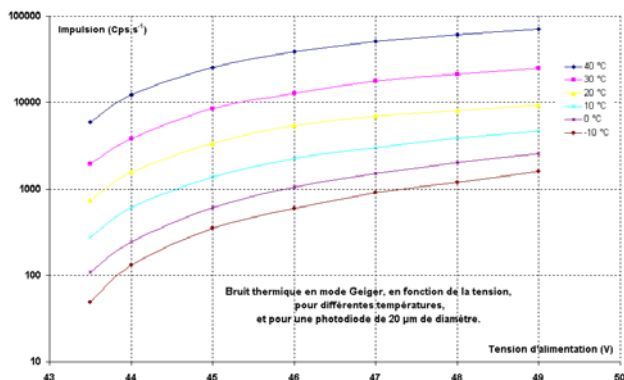


Figure 7. Bruit thermique en mode Geiger en fonction de la tension pour différentes températures et pour une photodiode de 20 µm de diamètre.

Le graphique confirme bien la prédiction théorique de variation du bruit en fonction de la température, soit une diminution d'un facteur deux tous les 8 °C [6].

Des mesures ont également été faites sur des SiPM placés dans le noir ainsi qu'exposés à la lumière, prouvant ainsi l'intérêt de les intégrer dans des instruments utilisés pour la détection fine de la lumière. Le graphique de la figure 8 quant à lui, montre le fonctionnement d'un SiPM dans le noir tandis que la figure 9 donne la réponse spectrale à

des impulsions de lumière. Cette dernière corrobore les résultats déjà obtenus avec des PM [8], avec un piédestal représentant le bruit sur la chaîne de mesure. Les pics suivants donnent le nombre de coups rencontrés en fonction de la tension de seuil appliquée (60 mV, 80 mV, 100mV, 120 mV, 140 mV, ...). Chacun de ces pics représente le nombre de PE compté à la fois (1 PE, 2 PE, 3 PE, 4 PE, 5 PE, ...).

La réponse spectrale de la figure 9, reste une simple démonstration pour valider l'importance et la faisabilité de ce dispositif. Dans le travail à venir, une optimisation de la qualité de cette réponse est considérée comme un objectif principal. Dans le cadre de cette optimisation, des améliorations technologiques peuvent être envisagées (exemple : la qualité du substrat définie par, la durée de vie, la résistivité, l'homogénéité...).

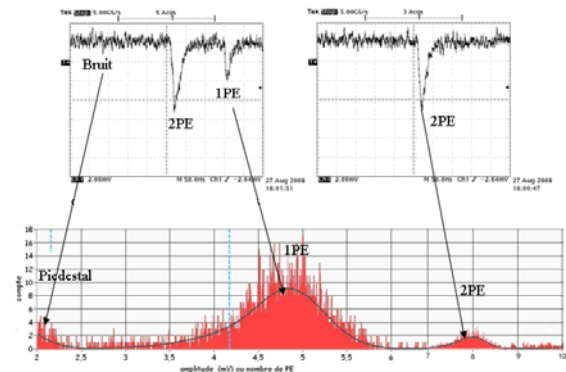


Figure 8. La réponse d'un SiPM dans le noir.

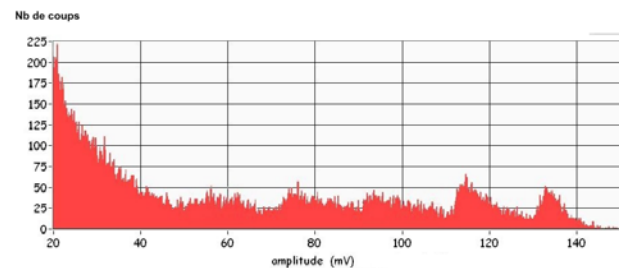


Figure 9. La réponse d'un SiPM en lumière.

5. Conclusion

Les résultats présentés dans cet article sont assez probants pour poursuivre le processus de fabrication d'imageurs de types APD - Geiger ou SiPM avec un grand nombre de pixels. Ceci permettra d'obtenir une large surface sensible pour des applications d'imagerie à photon unique. La possibilité de coupler les matrices à base d'APD - Geiger ou de SiPM avec des microlentilles, fabriquées dans le commerce ou en salle blanche, permettra d'augmenter la surface active de la matrice quant à la collection de lumière, tout en gardant le faible coût du photodétecteur, la sensibilité au photon unique ainsi que la haute résolution spatiale et temporelle. Ces dernières caractéristiques sont essentielles à l'utilisation de ces matrices, dans de nombreuses applications tant commerciales que scientifiques - télécommunications, informatique optique, bioluminescence, analyse chimique-.

Une très bonne performance temporelle, avec une haute efficacité quantique de détection dans le domaine visible, fait de ce genre de matrices un dispositif très convaincant et susceptible de remplacer les photomultiplicateurs dans un large éventail d'applications.

Références

- [1] <http://sales.hamamatsu.com/en/products/solid-state-division/si-photodiode-series/mppe.php?src=hp>.
http://www.sensl.com/Products/02Silicon_Photomultipliers-High_Gain_APDs.html.
- [2] A. Banoushi, M.R. Kardan and M. Ataee Naeini, "A circuit model simulation for separate absorption, grading, charge, and multiplication avalanche photodiodes", *ELSEVIER Solid-State Electronics* 49 (2005) 871–877.
- [3] D. Pellion, V. Borrel, D. Esteve, F. Therez, F. Bony, J.P.Gardou and A.R. Bazer-Bachi, "APD photodetectors in the Geiger photon counter mode", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 567 (2006) 41–44.
- [7] F. Zappa, S. Tisa, A. Tosi and S. Cova, "Principles and features of single-photon avalanche diode arrays", Politecnico di Milano, Dipartimento di Elettronica e Informazione.
- [5] P. Buzhan, B. Dolgoshein, L. Filatov, A. Ilyin, V. Kantzerov, V. Kaplin, A. Karakash, F. Kayumov, S. Klemin, E. Popova, S. Smirnov, "Silicon photomultiplier and its possible applications", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 504 (2003) 48–52.
- [6] J. C. Jackson, D. Phelan, A. P. Morrison, M. Redfern and A. Mathewson, "Towards integrated single photon counting arrays", *Optical Engineering*, vol. 42, no. 1, pp. 112-118, January 2003.
- [7] Brian F. aull, Matthew J. Renzi, Andrew H. Loomis, Douglas J. Young, Bradley J. Felton, Thomas A. Lind and David M. Craig, "Geiger-Mode Quad-Cell Array for Adaptive Optics ", in *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2008), paper CWF2.
- [8] Edo Waks, Kyo Inoue, William D. Oliver, Eleni Diamanti and Yoshihisa Yamamoto, "High-Efficiency Photon-Number Detection for Quantum Information Processing", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 9, No. 6, November/December 2003.