

# Fotomultiplicador de Silicio para Aplicaciones de Lidar Atmosférico

Jordi Riu<sup>1,\*</sup>, Michaël Sicard<sup>2,3</sup>, Santiago Royo<sup>1</sup>, Adolfo Comerón<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>*Centre de Desenvolupament de Sensors, Instrumentació i Sistemes, Universitat Politècnica de Catalunya, Rambla Sant Nebridi 10, 08222, Terrassa*

<sup>2</sup>*Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions, Laboratori de Remote Sensing, Universitat Politècnica de Catalunya, C/ Jordi Girona, 1-3, 08034, Barcelona*

<sup>3</sup>*Institut d'Estudis Espacials de Catalunya, Universitat Politècnica de Catalunya, C/ Jordi Girona, 1-3, 08034, Barcelona*

*jordi.riu@cd6.upc.edu*

**Resumen:** En este estudio se analiza la viabilidad y el rendimiento en cuanto a la utilización de un fotomultiplicador de silicio (SiPM) en comparación con los ya conocidos tubos fotomultiplicadores (PMT) ampliamente utilizados en aplicaciones de lidar atmosférico para detección de aerosoles. Mediante un montaje de lidar concebido para realizar medidas simultáneas con los dos tipos de detector, se analiza la respuesta del SiPM ante señales lidar que destacan por su gran rango dinámico, ancho de banda y potencia óptica extremadamente baja. Los resultados muestran que el SiPM ofrece unas prestaciones adecuadas para lidars elásticos para detección de aerosoles. No se tiene constancia de un estudio anterior en el cual se emplee este tipo de detector para dicha aplicación.

## 1. Introducción

Uno de los mayores problemas de los lidars atmosféricos tiene que ver con la reducida potencia óptica de las señales recibidas. Esto hace que los detectores utilizados tengan que disponer de una gran sensibilidad y elevada ganancia. A su vez, el ancho de banda y el rango dinámico de las señales reduce el abanico de detectores útiles a básicamente dos tipos, los tubos fotomultiplicadores (PMT) y los fotodiodos de avalancha (APD).

No obstante, en los últimos años se han desarrollado nuevos tipos de detectores capaces de ofrecer prestaciones semejantes, que a la vez concentran ventajas de unos y otros en un solo dispositivo. Así, los fotomultiplicadores de silicio (SiPM) son detectores de estado sólido que ofrecen una ganancia y un ancho de banda comparable al de los PMT. Están formados por una matriz de fotodiodos polarizados en modo Geiger sobre un mismo sustrato y bajo una misma tensión de polarización [1]. Cada uno de los píxeles es activado a través de la absorción de una pequeña cantidad de fotones obteniendo en la salida una corriente proporcional al número de píxeles activados, y por consiguiente, a la cantidad de fotones recibidos.

Este tipo de detector se ha empleado con éxito en diversas aplicaciones, tales como tomografía de emisión de positrones (PET), detección de partículas en física de altas energías y contadores de Cherenkov. Hasta ahora no existía ningún estudio que demostrase su viabilidad técnica en aplicaciones de lidar atmosférico.

## 2. Descripción del montaje

El lidar de la Universitat Politècnica de Catalunya se describe con detalle en la referencia [2]. Básicamente esta formado por un láser pulsado de Nd:YAG con un cristal de segundo armónico. La energía del pulso a 532nm es de 160mJ, tiene una duración de 8ns y una frecuencia de repetición de 20Hz. La parte de recepción consta de un telescopio de Ø40cm con una distancia focal de 3910mm. La señal óptica se transporta a un policromador a través de una fibra óptica de Ø3mm. Dicho policromador ha sido especialmente diseñado

para realizar medidas simultáneas de PMT y SiPM. Consta un primer grupo óptico de colimación y de un divisor de haz 50-50% para distribuir la señal óptica a cada uno de los detectores. Cada uno de ellos contiene un grupo óptico de focalización del haz sobre las áreas activas de los detectores. La digitalización analógica de la señal se hace a través de un módulo Licel TR20-160 Transient Recorder que ofrece una resolución vertical de 3.75m con una frecuencia de muestreo de 40Ms/s. En la siguiente tabla se detallan los parámetros de los detectores en las condiciones experimentales utilizadas. En el caso del SiPM se trata de un S10362-33-100C de Hamamatsu, mientras que el PMT es un modelo R7400P también de Hamamatsu.

**Tabla 1. Parámetros de los detectores a la tensión de polarización, temperatura y longitud de onda utilizadas en el experimento**

	SiPM	PMT
Tensión de polarización	-69.85 V	-830 V
Eficiencia	60%	10%
<i>Excess Noise Factor</i>	1.42	1.30
<i>Dark current</i>	0.7 $\mu$ A	4 nA
Área activa	9 mm <sup>2</sup>	50.26 mm <sup>2</sup>
Ganancia	2.4 $\times$ 10 <sup>6</sup>	1.3 $\times$ 10 <sup>6</sup>
<i>Dark count</i>	8 Mcps	80 cps

Tabla 1: Parámetros de los detectores.

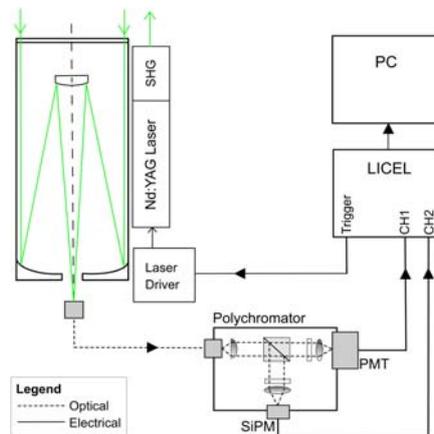


Figura 1: Montaje experimental para medida simultánea de SiPM y PMT en lidar.

### 3. Resultados

La medida se realizó el 18 de Octubre de 2011 entre las 2232 y las 2301 UTC con una temperatura exterior de 18°C. Tiene una duración de 30min y consta de 30 perfiles de 1min resultado de la integración de 1200 pulsos para cada uno. Se observaron aerosoles a 3.35Km. Conforme con AERONET, el espesor de éstos es relativamente bajo, alrededor de 0.05 a 532nm. El coeficiente de retrodispersión se extrae a partir de un algoritmo de inversión de dos componentes [3] mediante una constante de relación lidar de 50sr.

La relación señal-ruido (SNR) se muestra en la fig. 2. Por debajo de 3.35Km, la SNR del SiPM es aproximadamente 1.5-1.7 veces mayor que la obtenida en el PMT. El ruido predominante en alturas bajas es el *signal shot-noise* y se puede representar como:

$$SNR^{sn} = \left( \frac{P_s \lambda \eta}{2hcB F} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

donde  $P_s$  es la potencia óptica,  $\lambda$  la longitud de onda,  $\eta$  la eficiencia cuántica,  $h$  la constante de Planck,  $c$  la velocidad de la luz,  $B$  el ancho de banda y  $F$  el *excess noise factor*. Para una potencia óptica dada, la SNR para ambos detectores se aproxima a:

$$\frac{SNR_{SiPM}^{sn}}{SNR_{PMT}^{sn}} = \left( \frac{\eta_{SiPM} F_{PMT}}{F_{SiPM} \eta_{PMT}} \right)^{\frac{1}{2}} \approx 2.32 \quad (2)$$

Por encima de 8Km, la SNR del PMT es aproximadamente el doble que en el caso del SiPM. Para altas alturas, el ruido dominante corresponde al del detector y se puede aproximar de la siguiente forma:

$$SNR^m = \frac{q^{1/2} P_s \lambda}{hc(2B)^{\frac{1}{2}}} \left( \frac{\eta^2 M}{F I_d} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Donde  $I_d$  es la *dark current*. Dado que en ambos casos los factores de multiplicación son muy elevados, el ruido generado en la resistencia de carga de  $50\Omega$  es despreciable comparado con el *shot dark-current noise*. Para una potencia óptica dada, la relación SNR en ambos detectores se puede escribir como:

$$\frac{SNR_{PMT}^m}{SNR_{SiPM}^m} \approx \frac{\eta_{PMT}}{\eta_{SiPM}} \left( \frac{F_{SiPM} I_{d, SiPM} M_{PMT}}{F_{PMT} I_{d, PMT} M_{SiPM}} \right)^{\frac{1}{2}} \approx 1.70 \quad (3)$$

En ambos casos, los valores de SNR coinciden con los valores teóricos teniendo en cuenta la incertidumbre de los parámetros dados por el fabricante. El análisis muestra que el SiPM presenta una mejor relación señal-ruido en las regiones bajas de la atmósfera, donde los aerosoles están presentes. En alturas elevadas dentro de la troposfera, el PMT presenta una SNR mayor que el SiPM. Una relación señal-ruido menor en alturas altas provoca un incremento del error en la obtención del coeficiente de retrodispersión, propiciado por el ruido que afecta a la señal a la altura de calibración que es inversamente proporcional a la SNR [4]. En este estudio se obtiene que dicho error es aproximadamente el doble en el caso del SiPM.

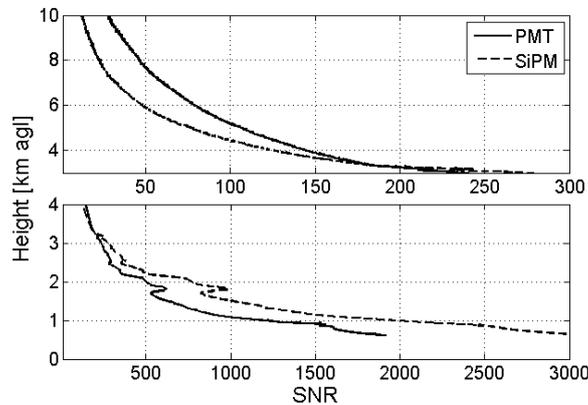


Figura 2: Relación Señal-Ruido en función de la altura en los detectores SiPM y PMT

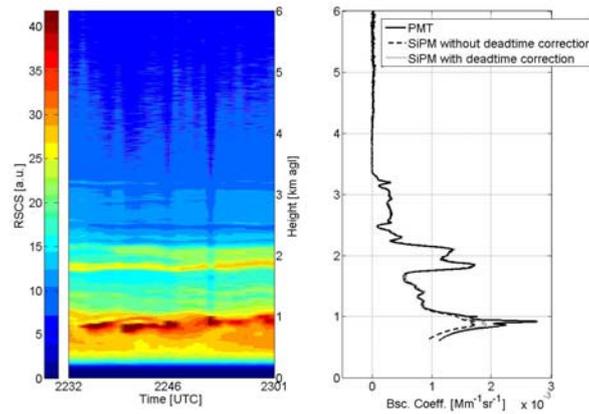


Figura 3: Medida temporal del RSCS entre las 2232 y 3201 UTC y el perfil del coeficiente de retrodispersión para los dos detectores SiPM y PMT

En la fig. 3 se muestran los perfiles del coeficiente de retrodispersión provocados por las capas de aerosoles así como las medidas temporales de RSCS (*range-square-corrected signal*). Se observa que los perfiles del PMT y del SiPM coinciden perfectamente para alturas mayores a 1 Km. Para alturas menores, el efecto del *dead-time* de los píxeles del SiPM provoca que este sea lento ante los cambios de la señal en condiciones de alto nivel de señal óptico. A pesar de este efecto, el estudio demuestra que el SiPM es un detector perfectamente adecuado para aplicaciones de lidar atmosférico ofreciendo rendimientos comparables a los del PMT [5].

#### 4. Conclusiones

Se ha demostrado la viabilidad del uso de detectores SiPM como alternativa a los convencionales PMT en aplicaciones de lidar atmosférico. Se ha diseñado y construido un sistema policromador *ad hoc* para la comparación de las respuestas de los dos tipos de detectores, demostrando la equivalencia en las medidas experimentales. Se aprecian mejores relaciones SNR para el SiPM a baja altura, y para el PMT a alturas elevadas.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia e Innovación (MICIIN) por los proyectos DPI2009-13379 y DPI2011-25525 que parcialmente han financiado esta investigación. Las actividades relacionadas con el lidar han sido financiadas por el 7th Framework Programme a través del proyecto Aerosols, Clouds, and Trace Gases Research Infrastructure Network (ACTRIS) (acuerdo de subvención no. 262254). Cabe destacar también la aportación de MICINN y FEDER bajo el proyecto TEC2009-09106/TEC y las acciones complementarias CGL2009-08031-E/CLI, CGL2010-09225-E y CGL2011-13580-E/CLI.

#### Bibliografía

- [1] K. Yamamoto, K. Yamamura, K. Sato, T. Ota, H. Suzuki, and S. Ohsuka, "Development of Multi-Pixel Photon Counter (MPPC)", in *Proceedings of IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec.*, (IEEE, 2006), pp. 1094-1097.
- [2] D. Kumar, M. Sicard, D. Tomás, C. Muñoz, F. Rocadenbosch y A. Comerón, *Proc. SPIE 6367*, 6367U-1 (2006).
- [3] J.D. Klett, "Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios", *Appl. Opt.* 24, 1638 (1985).
- [4] M. Sicard, A. Comerón, F. Rocadenbosch, A. Rodríguez, and C. Muñoz, "Quasi-analytical determination of noise-induced error limits in lidar retrieval of aerosol backscatter coefficient by the elastic, two-component algorithm", *Appl. Opt.* 48, 176 (2009).
- [5] J.Riu, M.Sicard, S.Royo, A.Comeron "Silicon photomultiplier detector for atmospheric lidar applications" *Optics Letters*, Vol. 37, Issue 7, pp. 1229-1231 (2012)