

# MÓDULO DE CONTEO DE FOTONES BASADO EN FOTODIODOS DE AVALANCHA

## PHOTON COUNTING MODULE BASED ON AVALANCHE PHOTODIODES

S.A. Bordakevich<sup>a</sup>, A.A. Kielbowicz<sup>a</sup>, I.H. López Grande<sup>a,b</sup>, M.A. Larotonda<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Física J.J. Giambiagi, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA,  
Pabellón 1 Ciudad Universitaria, C.A.B.A., Argentina

<sup>b</sup> Departamento de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones DEILAP (CITEDEF-CONICET),  
Villa Martelli, Buenos Aires, Argentina

email: mlarotonda@citedef.gob.ar

Recibido: 20/07/16; aceptado: 08/01/18

Se presenta el desarrollo y las características de un módulo de conteo de fotones basado en un fotodiodo de avalancha. La versión final del mismo está construida a partir de un fotodiodo Excelitas C30902SH-DTC, el cual dispone de un sistema de enfriamiento basado en celdas termoeléctricas. El circuito de *quenching* activo del mismo está construido a partir de electrónica discreta de alta velocidad. El módulo dispone de un acople a fibra óptica estándar FC que permite acoplar el detector a fibras multi o monomodo. Asimismo se caracterizó la tasa máxima de detecciones en alrededor de 500k c/s, una eficiencia de detección comparable a la de un módulo comercial, una tasa de cuentas de oscuridad de alrededor de 1500 c/s, y una probabilidad de *afterpulsing* del orden del 6%.

*Palabras clave:* fotodiodo de avalancha, conteo de fotones, quenching activo.

We report the development and characterization of a photon counting module based on an avalanche photodiode. The device uses an Excelitas C30902SH-DTC silicon avalanche photodiode as the detector, which has a built-in thermoelectric cooler. It includes a high speed active quenching circuit built using fast discrete integrated circuits. The device also includes a standard FC optical fiber connector, that allows to couple the detector to single or multi mode fibers. The maximum achievable count rate achievable is around 500k c/s, with a dark count rate of 1500 c/s and an afterpulsing probability of around 6%. These characteristics were obtained at a detection efficiency comparable to a commercial photon counting module.

*Keywords:* avalanche photodiode, photon count, active quenching.

### I. INTRODUCCIÓN

Los módulos de conteo de fotones son uno de los componentes más importantes para la detección de luz en regímenes de baja intensidad, ya sea para aplicaciones espectroscópicas, de criptografía cuántica u óptica cuántica en general o para aplicaciones LIDAR entre otras. En particular, en aplicaciones de óptica cuántica, estos detectores son utilizados en la implementación de algoritmos cuánticos y el desarrollo de sistemas prácticos de criptografía, entre otras aplicaciones [1-3].

Los distintos componentes de un módulo de conteo de fotones son los siguientes:

El *fotodiodo de avalancha*, que cumple la función de detector de fotones: consiste en un fotodiodo especial diseñado para trabajar polarizado, con una tensión de polarización ligeramente por encima del voltaje de ruptura. Se obtiene de esta forma un funcionamiento en modo Geiger, en analogía a los contadores de Geiger-Müller [4].

Un *circuito de quencheado o mitigación activa*, para detener la avalancha de electrones generada por la incidencia de un fotón y que, además, conforma el pulso digital de salida. Consta de un comparador rápido que sensa la avalancha, y una realimentación con retardo que funciona como un circuito monoestable. Es la parte más sensible de este desarrollo, y la que define en gran parte el desempeño del módulo de conteo.

Un sistema de *control de temperatura* a lazo cerrado, para enfriar y estabilizar la temperatura del detector. El fotodiodo polarizado por encima del voltaje de ruptura se vuelve muy sensible a cambios de temperatura de la juntura, por lo que el control de la temperatura de la misma es crítico. Además, al disminuir la temperatura sobre la juntura disminuye la probabilidad de emisión de una cuenta accidental, de origen térmico, que caracterizan al ruido del detector (cuentas oscuras).

Un *encapsulado* para los componentes anteriores, que provee además un acople a fibra óptica comercial,

brinda practicidad y versatilidad al módulo, pudiendo ubicarse éste lejos de la fuente de luz, en un ambiente térmica y eléctricamente más controlado.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un módulo replicable, con tecnología local y de bajo costo, basado en su componente principal, que es un fotodiodo de avalancha. En este reporte se detallan las características de los circuitos electrónicos, los componentes ópticos y mecánicos desarrollados a tal efecto.

## II FOTODIODO DE AVALANCHA

Un fotodiodo de avalancha está compuesto por un detector semiconductor de estado sólido de alta sensibilidad operado en el modo Geiger, en el cual un portador de carga generado por la incidencia de un único fotón produce una variación macroscópica de la corriente de salida. Esto se obtiene al polarizar el fotodiodo con una tensión inversa, ligeramente mayor al voltaje de ruptura  $V_r$ . Al aplicar una alta tensión de polarización en inversa  $V_{bias}$ , típicamente unos 5 V por encima de la tensión de ruptura, los fotodiodos de avalancha generan un efecto de ganancia en la corriente interna, debido a la ionización por impacto electrónico (avalancha). En general, cuanto más alta es la tensión de polarización, mayor es la ganancia. Una vez alcanzado este estado conductivo, es preciso mitigar o *quenchar* la avalancha, disminuyendo el valor de  $V_{bias}$  por debajo de la tensión de ruptura

Diversos parámetros de la dinámica del fotodiodo dependen del valor de tensión por encima de la ruptura al que está polarizado el fotodiodo  $V_{ov} \equiv V_{bias} - V_r$ . Como se muestra en la figura 1, al incidir un fotón sobre el área activa del fotodiodo se desencadena una avalancha de electrones, que se vuelve macroscópica en un tiempo del orden de las centenas de picosegundos.

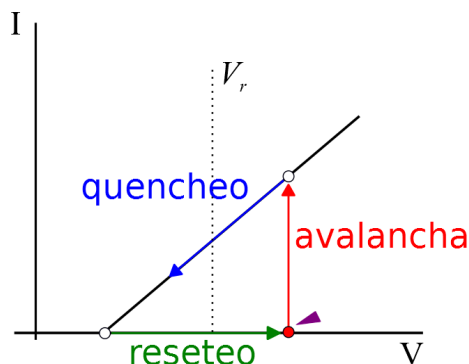


Figura 1: Esquema del funcionamiento de un fotodiodo de avalancha en modo Geiger: ante la incidencia de un fotón, se desencadena una avalancha de electrones que es detenida por un circuito de quencheo para volverlo al estado operativo de reposo, listo para una nueva detección luego de un tiempo muerto, o tiempo refractario.

## III CIRCUITOS DE QUENCHEO

### Quencheo Pasivo

El circuito de quencheo más sencillo es el denominado circuito pasivo. Consiste en una resistencia en serie con el detector, con la cual se limita la corriente

que circula sobre el fotodiodo al producirse la avalancha [5]. Así, la desactivación se produce porque al circular corriente se genera una gran caída de voltaje en la resistencia (típicamente de más de 200 kΩ). Luego de producirse el corte de la avalancha, la tensión  $V_{bias}$  se recupera lentamente, en un tiempo proporcional a la resistencia de carga por la suma de las capacidades del circuito). Durante este tiempo de recuperación el detector queda “ciego” y es insensible a fotones que llegan al mismo. Esto limita la tasa de conteo máxima.

### Quencheo Activo

Los circuitos de quencheo activo (CQA) en cambio, miden el voltaje del pulso de avalancha y reaccionan sobre el fotodiodo forzando el apagado de la misma. De esta forma no es necesario limitar la corriente sobre el fotodiodo con resistencias grandes y por esta razón, el tiempo muerto entre mediciones se puede reducir sensiblemente. Además, estos circuitos, al estar basados en comparadores, en general producen pulsos digitales a la salida, lo que evita agregar electrónica adicional de discriminación y conformación de pulsos. El esquema típico para quencheo activo es el de un circuito monoestable, es decir, un circuito que al ser disparado produce un pulso de duración pre-definida. El circuito luego retorna a su estado de espera, sin generar otra salida hasta que es disparado nuevamente. En este trabajo, se utilizó un diseño basado en componentes discretos [6]. La figura 2a) muestra un esquemático de este circuito.

Este circuito permite reducir el tiempo muerto a tiempos del orden de los 50 ns. Otra característica importante es que todo el circuito trabaja a voltajes del orden de  $V_{ov}$ , nunca supera los 10 V, y sólo el fotodiodo se encuentra polarizado a alta tensión. Así, se puede adaptar este circuito a prácticamente cualquier fotodiodo de avalancha, ya que es independiente de la tensión de ruptura. El mismo funciona de tal forma que cuando el sistema se encuentra en estado inactivo, el fotodiodo está en modo no conductivo. Por lo tanto, el comparador se encuentra en el estado lógico Low (0 V), y una pequeña corriente que fluye por  $R_1$  mantiene la entrada **A** (-) del comparador apenas por encima de **B** (+), lo necesario para mantener el comparador en Low. La diferencia  $V_A - V_B$  es el único parámetro que es necesario ajustar; esto se realiza mediante la resistencia variable  $R_2$ . Esta diferencia se fija en alrededor de 30 mV para evitar que el ruido eléctrico active el comparador. Si deja de circular corriente a través del diodo Schottky  $D_1$  (BAT83), la tensión en la entrada negativa del comparador queda por debajo de la otra entrada, cambiando el estado del comparador al lógico High (+3.6 V). La tensión en reposo sobre el fotodiodo de avalancha está fijada por el voltaje negativo de la fuente de alta tensión, la caída de tensión en los diodos  $D_2$  y  $D_3$  (LL4148) y la corriente mínima que circula por  $R_1$ . Una fotografía del circuito armado se puede observar en la Fig. 2b).

Cuando un fotón incide sobre el fotodiodo y se produce una avalancha, se crea un canal que reduce el

voltaje en el punto **C**, y consecuentemente en **A**. En este caso la diferencia  $V_A - V_B$  se invierte y la salida del comparador pasa a un estado lógico alto luego de un cierto tiempo de propagación. Esta transición también produce un cambio en el estado de la cadena de inversores  $I_1$  e  $I_2$ . La salida de este último pasa de +7 V a  $\approx 0$  V, y este flanco se transmite a través del capacitor  $C_1$  y la resistencia  $R_1$ , que mitigan (quenchan) la avalancha.

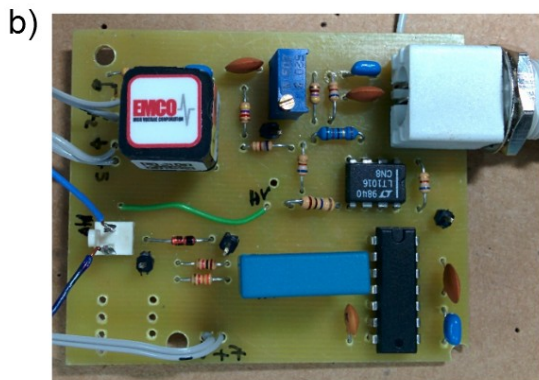
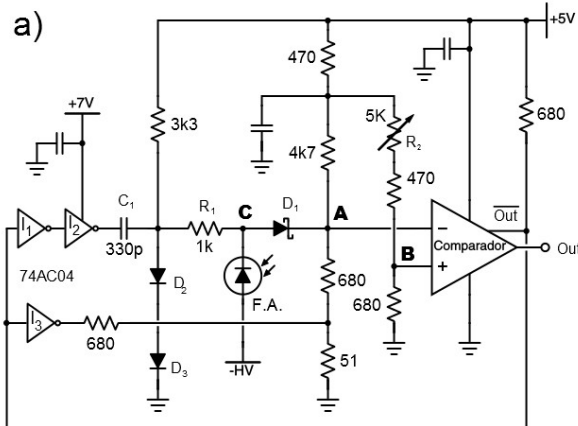


Figura 2: Circuito de quenching activo: a) plano esquemático detallado, b) prototipo terminado

Como ahora el fotodiodo está polarizado por debajo de la ruptura y el diodo Schottky no conduce, el fotodiodo se encuentra en un estado inoperante de detección, de manera que no sentirá fotones incidentes. El diodo se mantendrá en este estado por un tiempo de aproximadamente 25 ns, dado por tiempos de tránsito de los circuitos integrados. Este tiempo debe ser suficiente para que no queden cargas netas en la juntura, que vuelvan a disparar la avalancha. Mientras el sistema está realizando este proceso,  $V_A$  se encuentra aproximadamente 150 mV por debajo de  $V_B$ , de manera que el estado *High* del comparador se mantiene. El pulso negado del comparador también actúa a través del inversor  $I_3$ , produciendo un escalón de voltaje de alrededor de 500 mV sobre **A**. Esto termina llevando a  $V_A$  por encima de  $V_B$ , cambiando el estado del comparador a *Low* nuevamente. Así se sale del estado de quencheo y el detector se encuentra listo para detectar un fotón nuevamente. Una muestra de los valores de señal en distintos puntos del circuito se muestran en la figura 3.

La fuente de alta tensión utilizada es un convertidor DC-DC de alta tensión EMCO QH025-5, que entrega un voltaje de hasta 250 V proporcional a la tensión de entrada entre 0 y 5 V, y es capaz de entregar hasta 5 mA. El mismo tiene unas dimensiones de 12.7 mm × 12.7 mm × 12.7 mm y es fácilmente integrable a un diseño de circuito electrónico impreso.

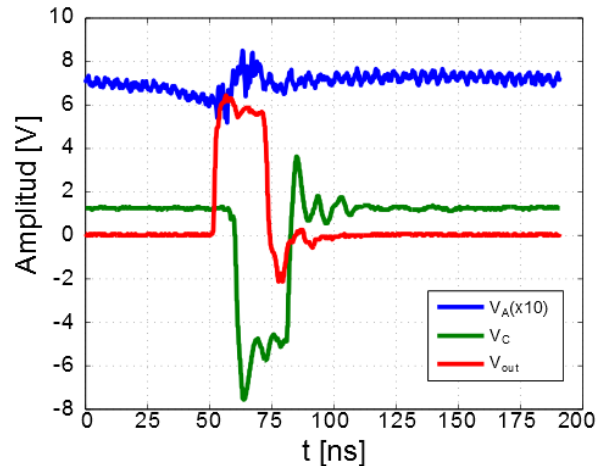


Figura 3: Tensiones en distintos puntos del circuito: en azul la tensión en la entrada  $V(-)$  del comparador (**A**), en rojo el pulso de salida del circuito, en verde la tensión en el cátodo del diodo (**C**).

La duración de los pulsos de salida y el tiempo entre ellos dependen fuertemente de la elección del comparador. Con un AD8611 de Analog Devices los pulsos de detección son del orden de los 20 ns de duración, y tiempos muertos entre mediciones de aproximadamente 70 ns, como se observa en la figura 4.



Figura 4: Pantalla de osciloscopio en modo permanencia de mediciones. Se observa el tiempo muerto entre mediciones. La escala temporal es de 20 ns/div. La escala vertical del canal de interés (azul, canal 4) es de 2 V/div. Se obtiene un pulso de salida de 25 ns con un tiempo mínimo entre eventos de 69 ns.

Si en cambio se utiliza un comparador más lento como el LT1016 de Linear Technology estos tiempos se incrementan un 30%, con la ventaja de un funcionamiento más estable y robusto. La tasa máxima de conteo obtenida es del orden de las 500 kc/s, aunque se espera poder llevar este número por encima de 1 Mc/s implementando un lazo de estabilización de la alta tensión de alimentación del fotodiodo.

#### IV CONTROL DE TEMPERATURA

Algunos modelos de fotodiodos, como el C30902SH-DTC de Excelitas utilizado incluyen un sistema de control de temperatura consistente en un enfriador termoeléctrico de dos etapas y un termistor unidos al diodo [7]. Para lograr un funcionamiento estable en temperatura es habitual utilizar un lazo PID que, en este caso se implementó utilizando el circuito integrado MAX1979.

Un lazo PID es un método de control basado en un lazo de realimentación; en este caso funciona monitoreando la discrepancia entre la temperatura real, medida sobre el detector, y la temperatura de trabajo elegida, e intentando que esta diferencia sea lo más pequeña posible tiempo a tiempo. Esto se logra considerando tres tipos de señal. La parte *proporcional*, o instantánea, que busca minimizar los errores actuales tiempo a tiempo, la parte *integral*, que busca minimizar la suma de los errores sucedidos en el pasado, y la parte *derivativa*, que al derivar la curva de la temperatura en función del tiempo, predice los probables errores futuros e intenta, también, minimizarlos.

El circuito de control de temperatura utilizado se construyó alrededor del MAX1979 [8], que contiene el lazo PID que estabiliza la temperatura del fotodiodo y es capaz de lograr estabilidades en temperatura del orden del miliKelvin. El circuito monitorea la temperatura del fotodiodo en tiempo real registrando la caída de tensión en un termistor. El circuito compara esta tensión con una tensión de ajuste y opera el lazo PID para aplicar una corriente sobre la celda termoeléctrica en función de la respuesta combinada de los términos proporcional, integrador y derivador.

La temperatura sobre el dispositivo puede calcularse usando los parámetros del termistor provistos por el fabricante (Fig. 5):

$$R(T) = 5.1k\Omega \exp \left[ \beta \left( \frac{1}{T + 273} - \frac{1}{298} \right) \right] \quad (1)$$

donde la temperatura  $T$  se mide en grados centígrados.

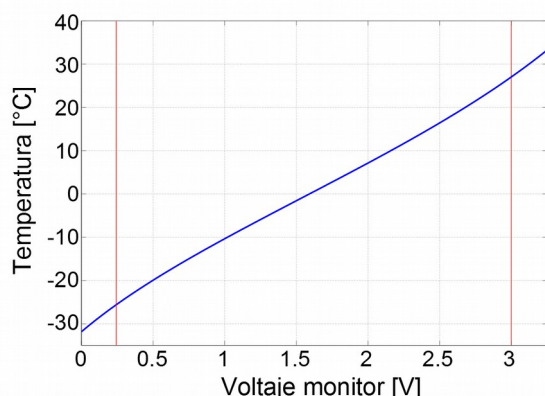


Figura 5: Relación entre la temperatura del diodo y la señal de monitoreo. Las barras verticales muestran el rango de temperaturas accesibles en el detector

Dado que la dependencia de la resistencia con la temperatura no es lineal, el circuito armado permite

elegir valores de resistencias en el circuito de monitoreo que generan una relación aproximadamente lineal en el rango de trabajo elegido. El circuito así construido es capaz de enfriar el fotodiodo de avalancha a  $-25^{\circ}\text{C}$ , se alimenta con una fuente DC de 5 V y provee una estabilidad mejor que el 1% en temperatura, estimada a partir de una medición de las fluctuaciones del valor de la resistencia del termistor en tiempos del orden de la decena de minutos.

El circuito armado es pequeño (tiene una pisada de  $6\text{ cm} \times 7\text{ cm}$ ) y permite su integración con otros componentes para obtener un sistema compacto. En la figura 6 se puede apreciar el módulo armado.

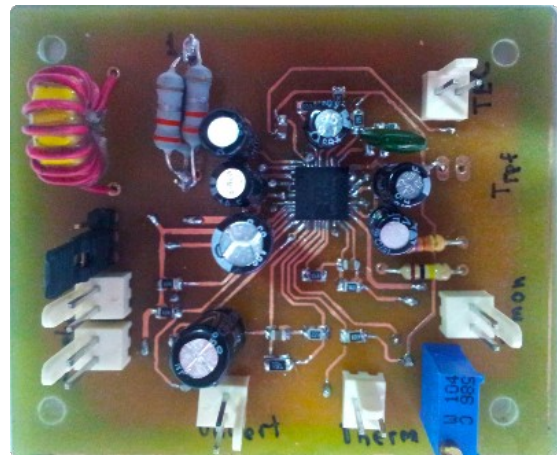


Figura 6: Foto del circuito de controlador de temperatura utilizado.

#### V. CARACTERIZACIÓN DEL MÓDULO

Se estudiaron diferentes características relevantes a un módulo de conteo de fotones. Para ello se utilizó un fotodiodo de avalancha Excelitas modelo C30902SH-DTC (específico para conteo de fotones) en conjunto con el circuito de quencheo activo y el controlador de temperatura de lazo cerrado.

##### Cuentas de Oscuridad

La tasa de cuentas de oscuridad es la cantidad de pulsos eléctricos por segundo emitidos por el detector en total oscuridad. Da una base mínima de detecciones para cualquier medición y define el nivel de ruido de la misma. Estas cuentas son intrínsecas al fotodiodo y dependen fuertemente de la tensión por encima de la ruptura  $V_{ov}$ . Además, existe una dependencia de esta tasa con la temperatura de la juntura del diodo. Para caracterizar estas cuentas de oscuridad del módulo se varió su temperatura. En la figura 7a) se muestra la variación de la cantidad de cuentas de oscuridad por segundo en función de la tensión aplicada, para distintas temperaturas en el rango entre los  $-25^{\circ}\text{C}$  y los  $25^{\circ}\text{C}$ .

También se registró el comportamiento de la tensión de pico de los pulsos de avalancha, en las mismas condiciones. En la figura 7b) se puede ver que independientemente de la temperatura, la amplitud de la misma es sólo función de  $V_{ov}$ .

El gráfico de la tensión de ruptura en función de la temperatura se observa en la figura 8: en rojo las de las curvas de cuentas de oscuridad y en azul los valores extrapolados de las curvas de tensión de pico. El ajuste lineal de todos los puntos permite modelar la tensión de ruptura de avalancha como

$$V_r = (195.6 \pm 0.06)V + T \cdot (0.68 \pm 0.04) \frac{V}{^\circ C} \quad (2)$$

Esta caracterización permite saber de forma bastante precisa cuál es la tensión de avalancha en función de la temperatura, y por ende cuál es la tensión en exceso  $V_{ov}$  que se está aplicando. Dado que tanto la eficiencia de detección como la tasa de cuentas de oscuridad, así como la probabilidad de *afterpulsing* depende de este valor, es fundamental poder contar con una buena estimación del mismo.

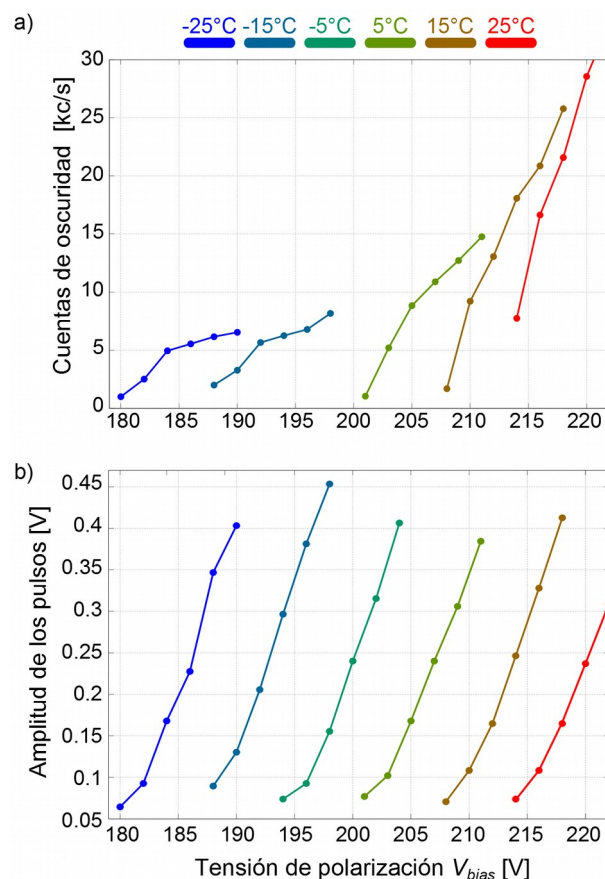


Figura 7: a) Cuentas de oscuridad en función de la tensión sobre el fotodiodo para distintas temperaturas. Para temperaturas cercanas a la proyectada de trabajo ( $-25^\circ C$ ), se puede obtener una tasa de cuentas de oscuridad de menos de 5000 c/s para  $V_{ov}$  menores o del orden de 5 V; b) Tensión de los picos en función de la tensión aplicada sobre el fotodiodo para distintas temperaturas. La relación entre el voltaje aplicado y la tensión de pico de las fotocuentas se estima experimentalmente en 40 mV/V.

### Afterpulsing

Debido a impurezas en el material semiconductor del que está hecha la juntura del diodo, algunas cargas pueden quedar atrapadas en éstas y no ser liberadas al

momento de la avalancha. Por esta razón, al finalizar la recarga del fotodiodo y superarse la tensión de ruptura, estas cargas se desprenden de las impurezas y pueden provocar una nueva avalancha inmediatamente después de la primera, como se muestra en la traza temporal de la Fig. 9. Esto se denomina *afterpulsing*. Así, existe una probabilidad de que el detector emita más de un pulso digital frente a la llegada de un fotón, generando cuentas (y correlaciones) espúreas a partir de un único evento inicial. La probabilidad de *afterpulsing* disminuye con el tiempo transcurrido después de un evento. La separación temporal entre estos pulsos está dado por el tiempo de reinicio del sistema. Entonces este tiempo no puede ser muy corto, debido a que aumentaría la probabilidad de obtener estos pulsos tardíos.

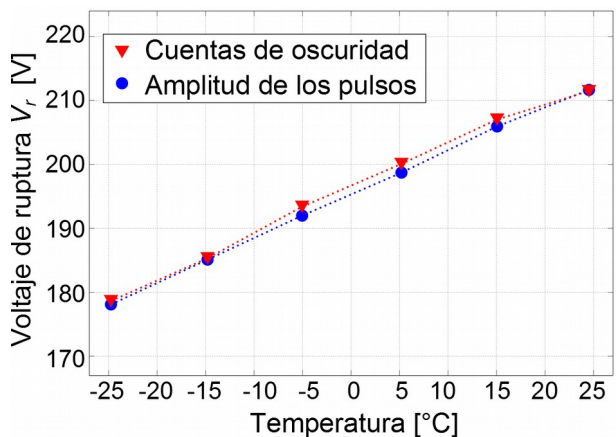


Figura 8: Tensiones de ruptura en función de temperatura, extrapoladas de las curvas de las mediciones de la figura 7.

Para calcular la probabilidad de *afterpulsing*, se tomaron unas diez mil capturas de pantallas del osciloscopio. Estos pulsos ocurren inmediatamente después del tiempo muerto, y su estadística se puede modelar con una ley de potencia, con un tiempo característico del orden de los 20 ns [9]. Con una intensidad sobre el detector de  $10^5$  c/s, se contaron eventos secundarios hasta 200 ns después del tiempo muerto del detector, y a este valor se le restó la probabilidad de obtener un pulso genuino, asumiendo una distribución de tipo Poisson para la ocurrencia entre eventos.

Se calculó de esta manera la probabilidad de ocurrencia de un pulso secundario durante diez tiempos característicos y se obtuvo un valor medio de la tasa de ocurrencia de este efecto de aproximadamente 5.5%.

### Detección de luz

Finalmente, para realizar un estudio preliminar del desempeño del módulo completo, se lo comparó con uno de los detectores de conteo de fotones del módulo de conteo comercial Excelitas SPCM-AQ4C, disponible en la División Óptica Cuántica.

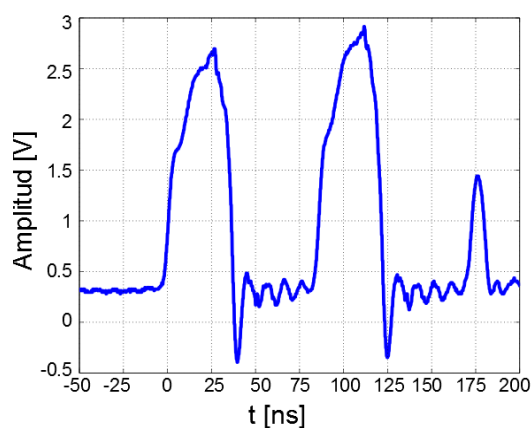


Figura 9: Pulso de salida del detector, mostrando un afterpulse aproximadamente 80 ns después de la detección inicial.

Se fijó la temperatura del fotodetector en  $-25^{\circ}\text{C}$ . Para esta temperatura, a partir del ajuste de la Eq. (2) se puede estimar la tensión de ruptura de avalancha en  $V_r=178,5\text{ V}$ . Como fuente de iluminación se utilizó un LED infrarrojo (Vishay TSHG8400, con espectro centrado en 830 nm), acoplado a una fibra multimodo, cuya intensidad se ajustó con el uso de polarizadores, de tal forma que el módulo comercial registrara 50 kc/s. Luego se acopló esta fuente de luz al módulo propio reconectando la fibra en el zócalo estándar FC/PC, de forma de mantener la misma condición de iluminación y acople de luz, y se contaron las fotodetecciones variando la tensión de polarización sobre el fotodiodo. Se midió entonces la cantidad de cuentas detectadas en función del voltaje en exceso sobre la ruptura,  $V_{ov}$ . Se repitió el mismo procedimiento con el módulo oscurecido, para obtener la tasa de cuentas de oscuridad en las mismas condiciones de temperatura y empaque.

El módulo comercial declara una eficiencia de detección del orden del 50% en su hoja de datos, [10] para el rango de longitud de onda entre el 750 y 850 nm. Se puede entonces determinar en forma aproximada la eficiencia de nuestro módulo para cada  $V_{ov}$  relacionándola con la tabulada para el módulo comercial. Esto se aprecia en el gráfico de la figura 10, en la cual se muestra eficiencia relativa al módulo comercial (eficiencia igual a 1 corresponde a una cantidad de cuentas promedio igual a la detectada por el módulo comercial). En esta figura se incluyen también las cuentas de oscuridad para cada una de esas tensiones.

A una condición de iluminación fija, se observa que la relación señal-ruido entre fotodetecciones y cuentas de oscuridad es aproximadamente constante, independiente de la tensión de polarización. Existe entonces una relación de compromiso entre eficiencia y cuentas de oscuridad: en caso de necesitar alta eficiencia, uno deberá lidiar con mayor cantidad de cuentas de oscuridad. De manera inversa, uno puede optar por pocas cuentas de oscuridad a cambio de una

baja eficiencia de detección del módulo. Tanto la temperatura del fotodiodo como la tensión de polarización se pueden variar en forma relativamente accesible

### Gabinete y acople a fibra

Se diseñó un gabinete de aluminio para contener al módulo, que permitiera no sólo alojar los circuitos, sino también aislar electromagnéticamente, proveer disipación térmica, y soportar al acople a fibra óptica. (Fig. 11). La disipación de calor del fotodiodo se produce a través de su base; la misma se acopla a la pared del gabinete, de 4 mm de espesor. La disipación contra un ambiente de  $25^{\circ}\text{C}$  probó ser suficiente para mantener la condición de regulación del lazo de control de temperatura.

El gabinete dispone de un acople estándar FC para fibra óptica multimodo o monomodo, el cual permite concentrar la luz que emerge de la fibra sobre el área activa del fotodiodo ( $0.2\text{ mm}^2$  [7]). Para ello se diseñó y construyó una pieza de aluminio que en un extremo monta un acople a fibra FC (SM1-FC de Thorlabs), y en el cuerpo de la misma, un par de lentes esféricas de distintas aperturas numéricas ( $\text{NA}=0.15$  para el lado de la fibra y  $\text{NA}=0.55$  para el lado del detector) que generan una imagen del extremo de la fibra sobre el área activa del detector. El cuerpo del fotodiodo encastra en la pieza de forma tal que la zona activa del mismo queda en la imagen de la punta de la fibra.

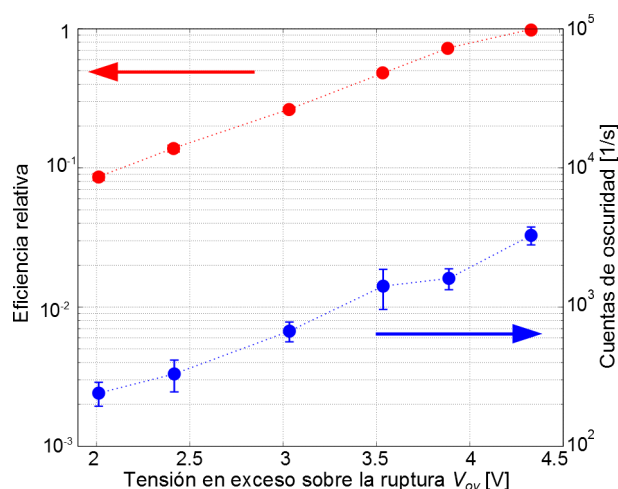


Figura 10: Eficiencia del módulo construido comparada con la de un equipo comercial (rojo), y cuentas de oscuridad por segundo, para distintas tensiones por encima de la tensión de avalancha  $V_{ov}$ . Una eficiencia relativa de 1 corresponde a una eficiencia de detección similar a la del módulo comercial, declarada por el fabricante en 50% [10].

## VII. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La versión final del módulo utiliza un fotodiodo Excelitas C30902SH-DTC, que tiene en su interior dos celdas Peltier en cascada para su enfriamiento. Para el control de temperatura se utiliza un lazo PID controlado por un circuito integrado MAX1979. El quencheo de la avalancha y la conformación de pulsos son realizados

por medio de un circuito activo basado en un comparador ultrarrápido y compuertas inversoras discretas. Con esta configuración se consiguió un tiempo muerto de aproximadamente 100 ns, una tasa máxima de detecciones del orden de  $5 \times 10^5$  c/s y, para un 50% de eficiencia de detección, las cuentas de oscuridad rondan las 2500 c/s. Para los tiempos muertos obtenidos, dados por el tiempo de reinicio del circuito, se observa una probabilidad de ocurrencia de *afterpulses* menor al 6%. El módulo está encapsulado en una caja de aluminio y dispone de un acople a fibra óptica con conectorizado estándar FC, que facilita la integración del módulo a experimentos en entornos no completamente oscuros.

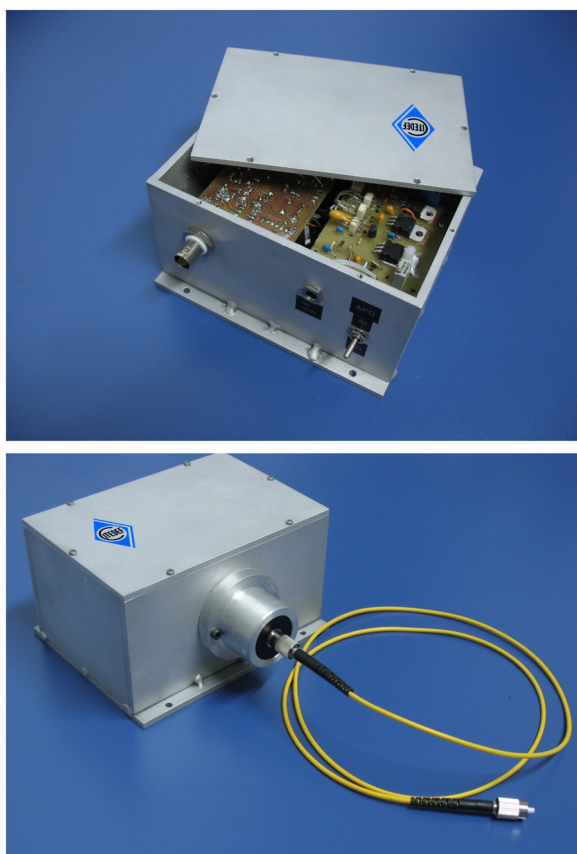


Figura 11: Módulo de conteo en su receptáculo, con acople estándar FC a fibra óptica.

Durante el desarrollo del módulo se identificaron algunas instancias críticas; varias de ellas estaban relacionadas con el diseño del circuito de alta velocidad (planos de tierra, montaje superficial en etapas muy tempranas del desarrollo del circuito, conectores inapropiados para el ancho de banda requerido, etc). Por otro lado, la estabilidad de la tensión de salida de la fuente de alta tensión es crítica para mantener un funcionamiento estable para distintos rangos de iluminación. Para ello lo que se propone para una segunda etapa es regular la misma con un lazo de realimentación. Asimismo es preciso que la fuente de alimentación general del circuito sea estable y de bajo

ruido. Finalmente, se observó la conveniencia de agregar un circuito de tipo *buffer*, para aislar eléctrica y dinámicamente el circuito de desactivación de la avalancha de la propia salida del módulo.

Como trabajo a futuro, es necesario desarrollar un circuito adecuado a los requerimientos de velocidad del circuito de quencheo de la avalancha. Además, es preciso completar la caracterización con medidas absolutas de eficiencia, y de respuesta espectral. El circuito empleado, al trabajar con baja tensión y sólo aplicar la alta tensión (negativa) sobre el ánodo, puede ser utilizado con distintos tipos de fotodiodos de avalancha. Se espera entonces poder adaptar el módulo a distintos detectores, y mejorar la eficiencia en distintas regiones del espectro.

Este trabajo fue realizado con financiación del Proyecto “SPCM” (O.T. 03NAC026/15) de CITEDEF y del proyecto PICT 2010-2483 de la ANPCyT. Una descripción completa de los circuitos desarrollados para el quencheo activo de la avalancha y para el control de la temperatura del módulo se pueden encontrar en [11]

## VIII. REFERENCIAS

- 1 - Hadfield, R.H. “[Single-photon detectors for optical quantum information applications.](#)” *Nature photonics* **3**, 696-705 (2009).
- 2 - Li, L.Q., and Davis, L.M. “[Single photon avalanche diode for single molecule detection.](#)” *Review of Scientific Instruments* **64**, 1524-1529 (1993).
- 3 - Priedhorsky, W.C., Smith, R.C., and Ho, C “[Laser ranging and mapping with a photon-counting detector.](#)” *Applied optics* **35**, 441-452 (1996).
- 4 - Friedman, H. “[Geiger counter tubes.](#)”, *Proceedings of the IRE*, **37**, 791-808 (1949).
- 5 - Cova, S., Ghioni, M., Lacaita, M., Samori, F., and Zappa, F. “[Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection.](#)” *Applied optics* **35**, 1956-1976 (1996).
- 6 - Stipčević, M. “[Active quenching circuit for single-photon detection with Geiger mode avalanche photodiodes.](#)” *Applied optics* **48**, 1705-1714 (2009).
- 7 - Fotodiodos de avalancha Excelitas serie C30902 [http://www.excelitas.com/Downloads/Silicon\\_InGaAs\\_APDs.pdf](http://www.excelitas.com/Downloads/Silicon_InGaAs_APDs.pdf)
- 8 - Controlador de temperatura Maxim MAX1979: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX1978-MAX1979.pdf>.
- 9 - Ziarkash, A.W., Joshi, S.K., Stipčević, M. and Ursin, R., “[Comparative study of afterpulsing behavior](#)”, *arXiv preprint arXiv:1701.03783* (2017).
- 10 - Módulo de conteo de fotones Excelitas SPCM-AQ4C: [http://www.excelitas.com/Downloads/DTS\\_SPCM-AQ4C.pdf](http://www.excelitas.com/Downloads/DTS_SPCM-AQ4C.pdf)
- 11 - Bordakevich, S.A., Kielbowicz, A.A., López Grande, I.H., y Larotonda, M.A. “Módulo de conteo de fotones basado en fotodiodos de avalancha”, Nota técnica 933 CITEDEF