



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

— **TELECOM** ESCUELA  
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR  
DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de  
Telecomunicación

Caracterización de fotodiodos de Germanio en fotónica de  
Silicio

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de  
Telecomunicación

AUTOR/A: Muñoz Valera, Jose Miguel

Tutor/a: Capmany Francoy, José

Cotutor/a: Pérez Galacho, Diego

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



## Resumen

Los fotodiodos integrados son componentes fundamentales en cualquier sistema actual de comunicaciones ópticas, ya que son los encargados de transformar la señal del dominio óptico al dominio eléctrico. La fotónica de Silicio se ha posicionado actualmente como la plataforma más prometedora para implementar dispositivos fotónicos de bajo coste, gracias a su compatibilidad con procesos de fabricación CMOS. En este trabajo se estudian los fotodiodos de Germanio implementados en tecnología de fotónica de Silicio; posteriormente se realiza la caracterización experimental de distintos fotodiodos implementados en esta tecnología.

Palabras clave: Fotodiodos integrados, Fotodiodos de germanio, Fotónica de silicio

## Resum

Els fotodíodes integrats són components fonamentals en qualsevol sistema actual de comunicacions òptiques, ja que són els encarregats de transformar el senyal del domini òptic al domini elèctric. La fotònica de Silici s'ha posicionat actualment com la plataforma més prometedora per a implementar dispositius fotònics de baix cost, gràcies a la seua compatibilitat amb processos de fabricació CMOS. En aquest treball s'estudien els fotodíodes de Germani implementats en tecnologia de fotònica de Silici; posteriorment es realitza la caracterització experimental de diferents fotodíodes implementats en aquesta tecnologia.

Paraules clau: Fotodíodes integrats, Fotodíodes de germani, Fotònica de silici

## Abstract

Integrated photodiodes are fundamental components in any current optical communications system since they are responsible for transforming the signal from the optical domain to the electrical domain. Silicon photonics has currently positioned itself as the most promising platform to implement low-cost photonic devices, thanks to its compatibility with CMOS manufacturing processes. In this work the Germanium photodiodes implemented in Silicon photonics technology are studied; later the experimental characterization of different photodiodes implemented in this technology is carried out.

Key words: Printed Photodiodes, Germanium photodiodes, Silicon Photonics



## Índice

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1.    | Introducción .....                                     | 1  |
| 2.    | Fotónica integrada.....                                | 3  |
| 3.    | Fotodetección .....                                    | 5  |
| 3.1   | Funcionamiento.....                                    | 5  |
| 3.2.  | Parámetros generales de los fotodetectores.....        | 6  |
| 3.2.1 | Capacidad de respuesta .....                           | 6  |
| 3.2.2 | Tiempo de respuesta.....                               | 7  |
| 3.2.3 | Corriente de oscuridad .....                           | 7  |
| 3.3   | Opciones tecnológicas de fotodetectores .....          | 8  |
| 3.3.1 | Silicio sobre aislante (SoI) .....                     | 8  |
| 3.3.2 | Fosforo de indio (InP) .....                           | 9  |
| 3.3.3 | Análisis de rendimiento y elección de tecnología ..... | 9  |
| 3.4   | Técnicas de acoplamiento e integración.....            | 10 |
| 3.4.1 | Modelos de acoplamiento.....                           | 10 |
| 3.4.2 | Modelos de integración .....                           | 11 |
| 3.5   | Tipos de fotodiodos.....                               | 12 |
| 3.5.1 | Fotodiodos PIN .....                                   | 12 |
| 3.5.2 | Fotodiodos MSM.....                                    | 13 |
| 3.5.3 | Fotodiodos APD.....                                    | 13 |
| 3.5.4 | Fotodiodos UTC.....                                    | 13 |
| 4.    | Fotodiodos de germanio sobre silicio.....              | 15 |
| 4.1   | Parámetros de diseño.....                              | 15 |
| 4.2   | Chip a caracterizar.....                               | 16 |
| 5.    | Metodología y Materiales.....                          | 18 |
| 5.1   | Metodología .....                                      | 18 |
| 5.2   | Materiales .....                                       | 18 |
| 5.2.1 | Software Necesario .....                               | 18 |
| 5.2.2 | Hardware Necesario .....                               | 18 |
| 6.    | Resultados .....                                       | 23 |
| 6.1   | Medidas en estática .....                              | 24 |
| 6.1.1 | Fotocorriente en función del voltaje.....              | 28 |
| 6.1.2 | Fotocorriente en función de la potencia .....          | 30 |



|  |    |
|--|----|
| 6.1.3 Fotocorriente en función de la longitud de onda..... | 31 |
| 6.2 Medidas en RF .....                                    | 33 |
| 6.3 Diagramas de ojo.....                                  | 41 |
| 7. Conclusiones .....                                      | 46 |
| 8. Bibliografía .....                                      | 47 |
| 9. Anexos.....   | 49 |
| 9.1 Código Matlab medidas estática .....                   | 49 |
| 9.2 Código Matlab medidas RF.....                          | 50 |

## Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Crecimiento de la fotónica integrada en los últimos años. [1].....  | 1  |
| Figura 2. Circuito fotónico integrado simple. [8].....  | 3  |
| Figura 3. Crecimiento de la fotónica integrada en los últimos años en diversas aplicaciones. [9]  | 4  |
| Figura 4. Crecimiento de la fotónica integrada en los últimos años por materia prima. [8] .....   | 4  |
| Figura 5. Vista previa de uso de un fotodetector. [8] .....   | 5  |
| Figura 6. Representación de la estructura de bandas y la absorción de un fotón en semiconductor de hueco directo (a) y hueco indirecto (b). [4] ..... | 6  |
| Figura 7. Corte transversal de fotodetector de guías de ondas con configuración vertical implementando tecnología SoI. [2] .....                      | 9  |
| Figura 8. Corte transversal de fotodetector de guías de ondas con configuración vertical implementando tecnología InP. [2] .....                      | 9  |
| Figura 9. Técnicas de acoplamiento (a) Edge coupling y (b) Surface coupling. [13] .....   | 10 |
| Figura 10. Acoplamiento con Grating Coupler. [12] .....   | 11 |
| Figura 11. Tipos de integración entre guía y material absorbente en el fotodetector (a) acoplamiento evanescente y (b) acoplamiento a tope. [4].....  | 11 |
| Figura 12. Producto de ancho de banda y eficiencia en función de longitud y grosor de región intrínseca. [2].....                                     | 12 |
| Figura 13. Producto de ancho de banda y eficiencia en función de longitud del fotodetector. [2] .....   | 14 |
| Figura 14: Corte transversal de nuestros fotodiodos con su estructura general. ....   | 16 |
| Figura 15: Vista capas del fotodiodo mediante el software “Klayout”. ....   | 16 |
| Figura 16: Vista del Chip Global .....  | 17 |
| Figura 17. Probe Station utilizada para la caracterización de los fotodetectores. ....  | 19 |
| Figura 18. Fuente de luz de fibra de alta intensidad de THORLABS (OSL2).....  | 19 |
| Figura 19. Microscopio Optem 125. ....  | 20 |
| Figura 20. Entrada y salida de la fibra por los moduladores de polarización.....  | 21 |
| Figura 21. Dispositivo Keithley 2400 series SourceMeter.....  | 21 |
| Figura 22. Setup utilizado en el laboratorio para la caracterización de los fotodetectores. ....  | 23 |
| Figura 23. Láser sintonizable Tunics-T100R. ....  | 24 |
| Figura 24. Puntas de conexión en condiciones de estática. ....  | 24 |
| Figura 25. Pantalla ampliada con las puntas haciendo contacto y la fibra acoplada. ....   | 26 |
| Figura 26. Fotocorriente obtenida en condiciones iniciales en todos los fotodetectores. ....  | 26 |
| Figura 27. Fotocorriente obtenida en función del grosor del substrato a) gráfico de línea b) gráfico de caja con bigotes. ....                        | 27 |
| Figura 28. Fotocorriente obtenida en función de la longitud del germanio a) gráfico de línea b) gráfico de caja con bigotes. ....                     | 27 |



|  |    |
|--|----|
| Figura 29. Fotocorriente obtenida en función del ancho del germanio a) gráfico de línea b) gráfico de caja con bigotes. ....   | 28 |
| Figura 30. Fotocorriente obtenida en función del ancho de la región intrínseca y de la guía de onda a) gráfico de línea b) gráfico de caja con bigotes. ....                                 | 28 |
| Figura 31. Fotocorriente en función de voltaje en dispositivo default a) Unidades lineales b) Unidades logarítmicas. ....  | 29 |
| Figura 32. Fotocorriente en función de voltaje en dispositivo “H220_L20_G3_I0_W1000” a) Unidades lineales b) Unidades logarítmicas. ....   | 30 |
| Figura 33. Fotocorriente en función de la potencia de salida del láser en dispositivo default a) Unidades lineales b) Unidades logarítmicas. ....  | 30 |
| Figura 34. Fotocorriente en función de potencia de salida del láser en dispositivo “H220_L20_G3_I0_W1000” a) Unidades lineales b) Unidades logarítmicas.....                                 | 31 |
| Figura 35. Comparación de fotocorriente máxima en distintos sustratos. ....  | 31 |
| Figura 36. Fotocorriente en función de longitud de onda en dispositivo default a) Unidades lineales b) Unidades logarítmicas. ....   | 32 |
| Figura 37. Fotocorriente en función de longitud de onda en dispositivo “H220_L20_G3_I0_W1000” a) Unidades lineales b) Unidades logarítmicas.....   | 32 |
| Figura 38. Láser no sintonizable utilizado en configuración de radiofrecuencia. ....   | 33 |
| Figura 39. Área de trabajo que incluye el chip en su soporte, la fibra y las puntas de RF.....   | 34 |
| Figura 40. Generador de señales MP1800A.....   | 34 |
| Figura 41. Modulador MX-LN-10. ....  | 35 |
| Figura 42. Analizador digital Tektronix DSAB200. ....  | 35 |
| Figura 43. Conexión de elementos de setup de radiofrecuencia mediante Biass Tee. ....  | 36 |
| Figura 44. Representación de ancho de banda a -3 dB del fotodetector “H220_L20_G3_I750_W1500”. ....  | 37 |
| Figura 45. Representación de ancho de banda a -3 dB del fotodetector “70_L40_G5_I1500_W1500”. ....   | 37 |
| Figura 46. Partes de un diagrama de ojo. ....  | 41 |
| Figura 47. Diagrama de ojos del fotodetector “H150_L40_G5_I1500_W1500” para distintos valores de bitrate a)1000 Mbps b) 2500 Mbps c) 5000 Mbps d) 7500 Mbps e) 10000 Mbps f) 12500 Mbps..... | 42 |
| Figura 48. Diagrama de ojos del fotodetector “H220_L20_G3_I750_W1500” para distintos valores de bitrate a)1000 Mbps b) 2500 Mbps c) 5000 Mbps d) 7500 Mbps e) 10000 Mbps f) 12500 Mbps.....  | 43 |
| Figura 49. Diagrama de ojos del fotodetector “H150_L40_G5_I1500_W1500” para bitrate fijo y distintos valores de voltaje de polarización a) 0 V b) 1 V c) 3 V d) 5 V. ....                    | 44 |
| Figura 50. Diagrama de ojos del fotodetector “H220_L20_G3_I750_W1500” para bitrate fijo y distintos valores de voltaje de polarización a) 0 V b) 1 V c) 3 V d) 5 V. ....                     | 45 |



## Índice de tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Cuadro comparativo de valores de mérito entre las tecnologías comentadas. ....                                   | 10 |
| Tabla 2. Datos de ancho de banda en los fotodetectores según sus parámetros de diseño.....                                | 38 |
| Tabla 3. Datos de ancho de banda en los fotodetectores según sus parámetros de diseño en<br>substrato grating y slab..... | 39 |
| Tabla 4. Información obtenida del análisis de las medidas de fotodetectores en RF. ....                                   | 40 |

## 1. Introducción

En este trabajo vamos a realizar una investigación sobre un tema muy demandado en la actualidad y con un futuro muy prometedor: la fotónica de silicio. Estudiaremos el funcionamiento y las características de este campo, y nos centraremos posteriormente en nuestro tema de estudio, que trata de la implementación en este tipo de tecnología de los fotodiodos de germanio. Explicaremos el funcionamiento de estos dispositivos, los distintos tipos y configuraciones que podemos encontrar, y realizaremos una caracterización de gran variedad de fotodiodos con distintos métodos para comprobar si su rendimiento cumple o no con nuestras expectativas.

El interés de este trabajo, y el motivo principal por el que se ha escogido el mismo, es mejorar los conocimientos actuales sobre los fotodiodos integrados. Pretendemos así, diseñar y desarrollar un gran banco de fotodiodos en el marco de un proyecto de colaboración con Huawei, para explorar qué parámetros de diseño nos permiten mejorar las funcionalidades de los fotodiodos.

El principal campo que abarca este trabajo es bastante obvio, el campo de la fotónica, que se describe como la ciencia y tecnología de la generación, procesamiento, control y detección de la luz, y que se utiliza ya en gran cantidad de sectores cotidianos. En nuestro caso, estamos hablando concretamente de la fotónica integrada, que es una tecnología prometedora y en auge, que trata de implementar múltiples sistemas voluminosos dentro de chips de luz. Para ello, es necesario el trabajo con tecnología de semiconductores, que explicaremos más adelante en el desarrollo de nuestro trabajo.

La fotónica integrada se ha posicionado actualmente como la plataforma más propicia para implementar dispositivos fotónicos de bajo coste, gracias a su compatibilidad con procesos de fabricación CMOS. Como consecuencia de esto, el número de trabajos e investigaciones sobre este tema ha aumentado en los últimos años y seguirá aumentando en un futuro, llegando a representar el mercado global de circuitos integrados fotónicos una cifra de 25.22 billones de dólares para 2027, dato que se puede apreciar en la figura 1.

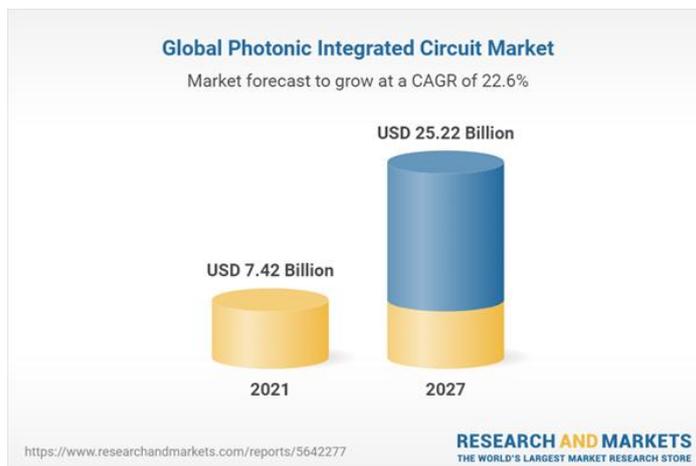


Figura 1. Crecimiento de la fotónica integrada en los últimos años. [1]

En particular, para nuestro trabajo han sido de gran ayuda las investigaciones realizadas en el PRL (Photonics Research Lab), lugar donde se ha llevado a cabo la realización de este trabajo y del que hemos obtenido gran cantidad de informes propios y de otros autores, que nos han ayudado a declarar las bases teóricas de nuestro trabajo.

Unas de las investigaciones que más nos han ayudado para la realización de nuestro trabajo han sido los informes desarrollados por Bowers [2] y Beling [3], que nos han dado a conocer el marco teórico de los materiales a utilizar para la detección mediante fotodiodos, con sus posibles ventajas y desventajas y las distintas configuraciones electrónicas de estos.



También ha sido de gran utilidad para la estructuración del proyecto la tesis realizada por Leopold Virot [4], un proyecto muy similar al nuestro, pero en versión extendida y con un análisis de resultados mucho mayor.

En cuanto a resultados, utilizamos un proyecto en el que participaba Hartmann [5] para comparar nuestros resultados con los comunes a la hora de realizar este tipo de experimentos.

En último lugar, hay que mencionar los manuales y datasheets del láser [6] y la fuente de tensión [7] proporcionados por el tutor, con los que hemos aprendido a manejar los instrumentos del laboratorio para realizar las simulaciones correspondientes de los fotodiodos.

Tras haber analizado el estado del arte acerca de nuestro trabajo, vamos a exponer los objetivos que nos planteamos a la hora de empezar con la investigación, y los que esperamos cumplir al finalizar el trabajo.

- Estudiar y comparar los distintos tipos de fotodiodos existentes para elegir la estructura ideal de los dispositivos de nuestro chip.
- Aprender a manejar la instrumentación necesaria de forma correcta para la realización del proyecto.
- Evaluar la influencia de los distintos parámetros de diseño en el rendimiento de los fotodiodos.
- Obtener una mejora y optimización de las prestaciones obtenidas con los fotodiodos utilizados por Huawei.

La hipótesis que nos planteamos y la que vamos a intentar resolver a lo largo de todo el proyecto es la siguiente:

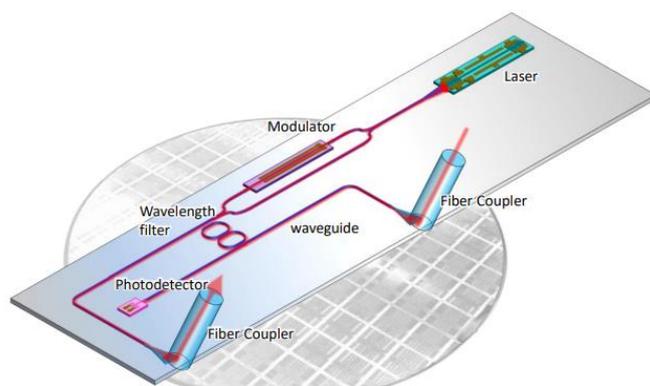
*“¿Sería posible diseñar un chip con una gran cantidad y variedad de fotodiodos, con el fin de encontrar alguno que consiga mejorar las prestaciones de los fotodiodos convencionales utilizados por Huawei?”*

## 2. Fotónica integrada

A continuación, pasaremos a mostrar el marco teórico del trabajo, empezando por una breve explicación sobre la aparición de la fotónica integrada, su importancia en la actualidad y su proyección de futuro.

La fotónica integrada es una rama de la fotónica referida a la integración de componentes fotónicos, es decir, integra la funcionalidad de la fotónica en un pequeño chip. Esto tiene gran cantidad de beneficios, como ya se ha podido contrastar al realizar el cambio en electrónica. De todos los beneficios, podemos destacar que se pueden hacer circuitos mucho más complejos, con un mejor rendimiento y con un consumo de potencia reducido, lo que hace que se reduzca el coste y el volumen de fabricación aumente.

Hay gran variedad de elementos que pueden ser incorporados en un chip fotónico. De hecho, se puede formar un circuito fotónico integrado simple, como el de la figura 2, utilizando solamente un láser como fuente de luz, un modulador, un filtro de longitud de onda y un fotodetector. Todos estos elementos se conectan entre sí por guías de onda.



**Figura 2. Circuito fotónico integrado simple. [8]**

Esta tecnología se utiliza mucho en la actualidad, debido a que la luz se propaga por las guías de onda con pérdidas muy pequeñas. La velocidad de la luz es muy elevada en estos medios (diez veces más que en un chip electrónico) y, por tanto, podemos propagar con una gran capacidad de transmisión.

Tiene gran cantidad de aplicaciones en distintas áreas: comunicaciones (tanto por fibra como de manera inalámbrica), sensores ópticos, medicina o computación cuántica.

En la figura 3, vemos un reparto del uso de la fotónica integrada, tanto por regiones, como por las distintas áreas de comunicación anteriormente mencionadas. Hoy en día, es una tecnología muy codiciada en Norte América y en las comunicaciones de fibra óptica, aunque vemos que en los próximos años tomará más importancia en sectores como la biomedicina, con avances en biosensores fotónicos que aprovechen la capacidad de análisis espectral para analizar sustancias y respuestas químicas o biológicas, así como en dispositivos con sistemas de imagen, que permitan analizar tejidos en busca de células de tejido canceroso. Tanto es así, que la idea es que en los próximos años se creen dispositivos fotónicos en los que se pueda depositar una muestra (sangre o saliva) y se pueda hacer un análisis de diversas enfermedades con ella.

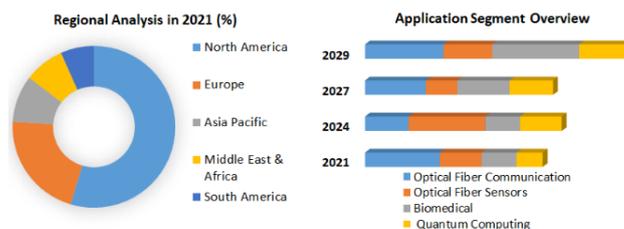


Figura 3. Crecimiento de la fotónica integrada en los últimos años en diversas aplicaciones. [9]

Otro punto importante del que hablar es la materia prima utilizada a la hora de crear los circuitos fotónicos integrados: los denominados semiconductores, que son sustancias con propiedades entre los conductores y los aislantes. Por un lado, los conductores tienen la capacidad de conducir muy bien la electricidad, con una estructura interna en la que sus electrones tienen libre circulación aplicando una tensión; mientras que los aislantes son elementos donde los electrones que pueden conducir la electricidad están a un nivel muy bajo, y para poder pasar a un nivel alto requieren mucha energía. Los semiconductores, al ser una mezcla de ambos, a temperatura ambiente solo una pequeña parte de los electrones puede conducir, mientras que los demás pueden pasar a este estado suministrándoles poca energía. De esta manera, y aplicando tensión, podemos controlar su capacidad de conducción.

A diferencia de la electrónica (donde casi exclusivamente se usa el silicio), en fotónica existe un mercado muy fragmentado. Si observamos la figura 4, vemos que se requiere una gran cantidad de elementos para la fabricación de los circuitos fotónicos integrados, con combinaciones de materiales del grupo III y V del sistema de la tabla periódica, ya que el silicio por sí solo no puede generar luz. Se puede apreciar claramente que el Indium Phosphide (Fosforo de Indio) predomina tanto en la actualidad como en un futuro próximo.



Figura 4. Crecimiento de la fotónica integrada en los últimos años por materia prima. [8]

En el siguiente apartado, profundizaremos dentro de la fotónica integrada y nos centraremos en la fotodetección y los dispositivos que la hacen posible, que es la base para la caracterización de los fotodiodos.

### 3. Fotodetección

Los fotodetectores son convertidores optoelectrónicos (O/E), es decir, son dispositivos cuya tarea es convertir señales ópticas en eléctricas. Reciben luz de entrada ya modulada y convierten los fotones incidentes en corriente eléctrica o voltaje. El fotón absorbido crea un par electrón hueco que puede ser recogido por un circuito de lectura. La obtención de este resultado se logra mediante el empleo de materiales metálicos, aprovechando el fenómeno del efecto fotoeléctrico. No obstante, se considera más apropiado emplear fotodetectores basados en materiales semiconductores, y estos dispositivos se conocen comúnmente como fotodiodos.

Se puede ver una imagen explicativa en la figura 5, aunque en el siguiente apartado explicaremos cómo se realiza este proceso en detalle.

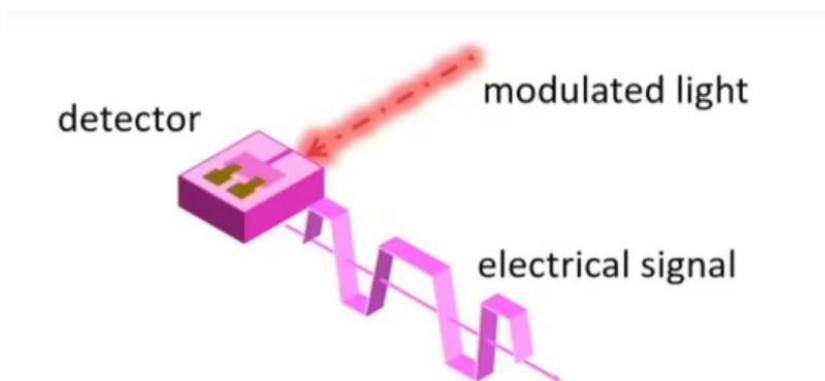


Figura 5. Vista previa de uso de un fotodetector. [8]

#### 3.1 Funcionamiento

En el contexto de semiconductores, se encuentra un espacio denominado “banda prohibida”, que separa la banda de valencia de la banda de conducción. La magnitud de energía de este espacio, representado como  $E_g$ , determina las longitudes de onda a las que el semiconductor puede absorber luz. Cuando iluminamos el semiconductor con un haz de luz, compuesto por fotones con energía igual o superior a la energía de banda prohibida, como se muestra en la ecuación 1, estos fotones son capturados y transfieren su energía a los electrones que se encuentra en la banda de valencia. Estos electrones, adquieren suficiente energía para moverse a la banda de conducción, dónde se comportan como cargas libres. En un escenario ideal, un fotón incidente provoca la formación de un par electrón-hueco, es decir, un electrón se desplaza a la banda de conducción mientras que se crea un hueco en la banda de valencia.

$$\frac{hc}{\lambda} \geq E_g \quad (1)$$

Existen dos categorías de semiconductores que se distinguen según su banda prohibida, que puede ser directa o indirecta. La distinción entre estos dos tipos de gap radica en como el electrón excitado se desplaza hacia la banda de conducción.

En el caso de semiconductores con banda prohibida directa, la estructura de bandas del material es tal que tanto el punto máximo de la banda de valencia como el punto mínimo de la banda de conducción coinciden en el mismo punto del vector  $k$  en la zona de Brillouin ( $k=0$ ). En este escenario no se requiere la emisión de fonones, lo que hace que el proceso de absorción sea más eficiente.

Por otro lado, en los semiconductores con banda prohibida indirecta, el punto máximo de la banda de valencia y el punto mínimo de la banda de conducción no se superponen, lo que significa que la absorción de un fotón debe ir acompañada de la emisión de un fonón. Esto hace que el proceso sea menos eficiente. En las transiciones directa, se conserva tanto la energía como el momento, mientras que, en las transiciones indirectas, la conservación del momento se logra mediante la interacción adicional de los electrones con la red cristalina, es decir, con los fonones. Los semiconductores del grupo IV (Si y Ge), exhiben una banda prohibida indirecta, mientras que las aleaciones semiconductoras del grupo III-V (InP, GaAs, InGaAsP...) presentan una banda prohibida directa. A continuación, mostramos una representación gráfica de ambos tipos en la figura 6.

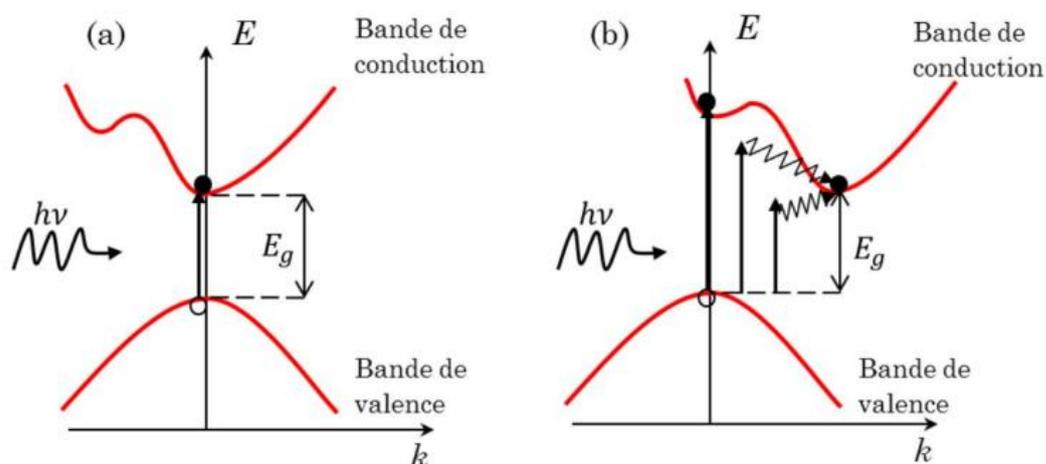


Figura 6. Representación de la estructura de bandas y la absorción de un fotón en semiconductor de hueco directo (a) y hueco indirecto (b). [4]

### 3.2. Parámetros generales de los fotodetectores

Para las aplicaciones en fotónica en silicio en las que nos vamos a centrar, un fotodetector debe ser capaz de detectar una señal óptica muy rápida (Gbps), de baja potencia y con el menor consumo eléctrico posible. Para ello, se pueden definir criterios básicos de rendimiento, que van en función de los parámetros físicos de los fotodetectores.

#### 3.2.1 Capacidad de respuesta

La eficacia de un fotodetector en la conversión de una señal óptica en eléctrica se puede definir por su capacidad de respuesta. Esta capacidad se cuantifica como la relación existente entre la corriente fotogenerada y la potencia de luz incidente, expresada en unidades de A/W. Si estimamos que cada fotón absorbido da lugar a la creación de un par electrón-hueco, podemos escribir su fórmula tal y como está expuesta en la ecuación 2, donde  $\eta$  representa la eficiencia cuántica externa del dispositivo, que refleja la fracción de fotones incidentes que generan una señal eléctrica en el fotodetector, teniendo en cuenta cómo se acopla la guía de ondas con el fotodetector.

$$R = \eta \frac{I}{P} \quad (2)$$

La capacidad de respuesta máxima teórica de un fotodetector está relacionada con la longitud de onda de la señal óptica y otras constantes físicas, entre ellas la carga elemental, la velocidad de la luz o la constante de Planck. En la ecuación 3 podemos ver su fórmula.

$$R_{th} = \frac{q\lambda}{hc} \quad (3)$$

Para una longitud de onda de 1550 nm, el valor teórico máximo es  $R_{th} = 1.25 A/W$ , que corresponde a una absorción perfecta y una recolección ideal de portadores.

En la realidad, la responsividad medida siempre será menor que este valor máximo. Esto se debe, en parte, al factor  $\eta$ , pero también a la naturaleza exponencial de la absorción, que implica una absorción total solo en caso de una longitud de absorción infinita. Además, si los portadores se generan en zonas prácticamente neutras (donde no pueden ser extraídos debido a un campo eléctrico casi nulo), se recombinarán y no podrán contribuir a la corriente fotoeléctrica.

Sin embargo, es factible lograr valores por encima del límite teórico máximo mediante el uso de fotodetectores que operan en modo de ganancia, como los fotodiodos de avalancha. Este comportamiento se explicará en detalle en la sección 3.5, donde mencionaremos los distintos tipos de fotodetectores que existen y sus características.

### 3.2.2 Tiempo de respuesta

El tiempo de respuesta se define como el tiempo que tarda el fotodetector en responder a cambios en la intensidad de luz incidente. Este tiempo está relacionado con la velocidad de los portadores de carga en el material del fotodetector, y puede oscilar entre nanosegundos y microsegundos dependiendo del fotodetector y su aplicación. Un fotodetector debe poder operar a una frecuencia del orden de la frecuencia de la señal para convertir la señal óptica en una señal eléctrica. La respuesta de frecuencia de un fotodetector está limitada principalmente por dos factores.

1. El tiempo de tránsito de las portadoras fotogeneradas: es el intervalo de tiempo requerido para que las portadoras alcancen los electrodos y contribuyan a la señal del fotodetector. Este tiempo se calcula según la ecuación 4, considerando que una portadora viaja a una velocidad de deriva  $v_{sat}$  y que debe cruzar toda la zona intrínseca de ancho  $w_i$ .

$$\tau_{tr} = \frac{w_i}{v_{sat}} \quad (4)$$

2. El retardo inducido por las resistencias y capacidades del fotodetector: Cuando se trata de un fotodiodo de tipo pin, la resistencia en las regiones dopadas (p y n), junto con la capacitancia de la unión y las capacitancias externas, influirá directamente en el retardo, generalmente representado como RC. La determinación de este retardo se deriva de la ecuación 5, donde R representa la resistencia equivalente y C la capacitancia equivalente del fotodiodo.

$$\tau_{RC} = RC \quad (5)$$

Otro factor que puede ejercer influencia es el tiempo de difusión de las cargas generadas en regiones desprovistas de un campo eléctrico. Estas cargas tienden a desplazarse hacia los electrodos o áreas donde existe un campo eléctrico, lo que resulta en un tiempo de difusión más prolongado en comparación con el tiempo de tránsito. Sin embargo, este fenómeno rara vez se produce en la práctica, dado que el diseño de los fotodiodos se realiza de manera que las cargas se ubiquen en áreas donde pueden ser fácilmente transportadas debido al campo eléctrico presente.

### 3.2.3 Corriente de oscuridad

La corriente de oscuridad hace referencia a la corriente que fluye en el fotodetector, incluso en ausencia de luz incidente, es decir, cuando no presenta una señal óptica. Este parámetro puede afectar a la sensibilidad y a la precisión de la medición de nuestro fotodiodo, por lo que será importante su valor en el estudio de nuestros dispositivos.

Esta corriente aparece debido a la liberación térmica de electrones de la estructura cristalina del detector, lo que hace que se origine una corriente constante. La magnitud de esta corriente de oscuridad depende de varios factores. Entre ellos, podemos destacar la calidad del cristal, ya que los defectos que se pueden encontrar en la estructura cristalina se convierten en puntos de generación y recombinación de portadores. El gap del material también es un elemento importante en esta medida, ya que cuanto menor sea, mayor será la generación de portadores por efectos de tunelización. La intensidad del campo eléctrico y la temperatura también influirán, obteniendo una mayor corriente de oscuridad al aumentar sus valores.

La corriente de oscuridad es un factor que contribuye directamente al ruido de disparo en un fotodetector, lo que significa que se puede interpretar como una fuente de ruido. Debido a esto, será necesario minimizar este parámetro, con el fin de no degradar la relación señal-ruido y limitar el consumo de energía del dispositivo, asegurando una mayor sensibilidad y resolución y disminuyendo el impacto del ruido en la señal detectada.

### 3.3 Opciones tecnológicas de fotodetectores

En este apartado, vamos a centrarnos en dar a conocer las opciones tecnológicas de fotodetectores más comunes y sus correspondientes características, pese a que, en la actualidad, cada día son más las nuevas opciones que están apareciendo.

Las tecnologías más utilizadas son SoI (usando germanio), InP (usando InGaAs) e InP híbrido sobre silicio con Tecnología SoI, aunque en este último no entraremos en detalle, ya que únicamente es ventajoso cuando se integran muchas funcionalidades en el chip, y en nuestro caso simplemente caracterizaremos un banco de fotodetectores.

#### 3.3.1 Silicio sobre aislante (SoI)

La tecnología SoI (silicon-over-insulator) es una de las tecnologías basadas en silicio más desarrolladas. Se utiliza para fabricar dispositivos ópticos integrados en sustratos de silicio y ofrece manipulación pasiva de la luz en un espacio muy pequeño, debido al alto contraste de índices de refracción entre el silicio y el óxido de silicio, y favoreciendo así la propagación de la luz y una buena densidad de integración. Se basa en la creación de una capa aislante, compuesta generalmente de óxido de silicio entre la base y la capa activa del fotodetector. Esta técnica requiere la detección de la luz en la banda C, lo que imposibilita la utilización del silicio como material absorbente debido a que es transparente en esta banda. Por ello, es necesaria la utilización del germanio, ya que es capaz de absorber la luz con una gran eficiencia hasta longitudes de onda de 1700nm, aunque a partir de los 1500nm su capacidad de respuesta comienza a reducirse.

Este material ya existe en la Tecnología CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor), que es una técnica basada en la inclusión de transistores MOSFET para construir circuitos digitales y analógicos. De hecho, es de las más comunes y populares en la industria de semiconductores debido a su eficiencia energética, su compatibilidad con escalas de integración muy altas y su capacidad de integración de funciones digitales y analógicas en chips. Utilizando el germanio como material absorbente, garantizamos la compatibilidad con esta técnica de fabricación de circuitos integrados y facilitamos la integración con otros componentes electrónicos, como amplificadores de transimpedancia o circuitos de procesamiento de señales, que se suelen utilizar en conjunto con los fotodetectores. Además, al utilizar el material base más económico y con mejor calidad cristalina entre los semiconductores, se consigue abaratar el coste de los chips fabricados. Podemos ver un esquema de sus respectivas capas en la figura 7.



Figura 7. Corte transversal de fotodetector de guías de ondas con configuración vertical implementando tecnología SoI. [2]

### 3.3.2 Fosforo de indio (InP)

Esta tecnología ofrece amplificación y detección de luz, además de filtrado, división o interferencia. Ha sido altamente utilizada para la fabricación de moduladores, láseres y fotodetectores, generalmente basados en un paso de crecimiento epitaxial. En este caso, como material absorbente, se utiliza una estructura con diferentes materiales para optimizar la sensibilidad y la respuesta espectral en diferentes rangos, aunque a costa de una mayor complejidad. El material elegido normalmente es InGaAs, una aleación semiconductora que presenta banda prohibida directa y un mayor coeficiente de absorción que el germanio en la banda C, obteniendo también buenos valores de absorción en la banda L. Todo esto hizo que fuese uno de los primeros materiales utilizados como absorbente en la fotodetección.

Como punto negativo, se puede decir que posee un índice de refracción más bajo que el germanio, por lo que puede ser más difícil su utilización en el diseño de dispositivos de tamaño reducidos y compactos.

En la actualidad, se considera una tecnología con gran fiabilidad y grado de madurez. Se están generando grandes avances, llegando incluso a desarrollar varias capas de crecimiento epitaxial, permitiendo reducir las pérdidas y utilizar componentes más avanzados.

A continuación, vemos el esquema de sus respectivas capas en la figura 8.



Figura 8. Corte transversal de fotodetector de guías de ondas con configuración vertical implementando tecnología InP. [2]

### 3.3.3 Análisis de rendimiento y elección de tecnología

En este apartado, comentaremos y compararemos los valores técnicos y experimentales de ambas tecnologías. En la tabla 1, tenemos una comparación de los resultados que ofrece cada una de las técnicas en términos de capacidad de respuesta, corriente de oscuridad y ancho de banda.

La tecnología SoI se caracteriza por tener un valor de capacidad de respuesta baja y un ancho de banda limitado (valores máximos de 40 GHz [10]), debido a una menor superficie de contacto óhmico entre el germanio y los contactos. Sus valores de corriente de oscuridad son los típicos en fotodetección.

Por otra parte, la tecnología InP consigue unas prestaciones bastante superiores en todos los aspectos, tanto de capacidad de respuesta y corriente de oscuridad como de ancho de banda (se han encontrado resultados de hasta 170GHz [11]).

| Tecnología | Capacidad de respuesta (A/W) | de Corriente oscuridad ( $\mu\text{A}$ ) | de Máximo ancho de banda (GHz) |
|------------|------------------------------|--|--------------------------------|
| SoI        | 0.6                          | 0.1-1                                    | 40                             |
| InP        | 0.8                          | 0.01                                     | 170                            |

Tabla 1. Cuadro comparativo de valores de mérito entre las tecnologías comentadas.

Analizando los datos que han sido recopilados de distintos proyectos punteros en ambas tecnologías, llegamos a la conclusión de que la tecnología InP es más recomendable en términos de resultados, aunque a costa de su alto coste. Es por esto que, para la realización de nuestro trabajo, se ha elegido trabajar con tecnología SoI, o, en otras palabras, utilizando fotodetectores de germanio como material absorbente sobre capa de silicio, con el objetivo de realizar el experimento intentando abaratar los costes y consiguiendo un menor grado de complejidad.

### 3.4 Técnicas de acoplamiento e integración

En este apartado, vamos a hacer una breve explicación sobre las técnicas de acoplamiento e integración presentes en la fotónica integrada. A su vez, nombraremos cuáles de estas han sido las utilizadas en el desarrollo de nuestro proyecto.

#### 3.4.1 Modelos de acoplamiento

El acoplamiento entre fibra y los circuitos fotónicos integrados es un factor clave en el diseño. Un mal acoplamiento entre estos puede generar grandes pérdidas en el diseño (pérdida de potencia y sensibilidad, reflexiones y ruido), debido a la desadaptación de los perfiles entre los modos de fibra y guía y a la formación de cavidades Fabry-Perot dentro de la guía por la reflectividad presente en los extremos de esta. Por estas causas, es necesario un acoplamiento eficiente que consiga minimizar estas pérdidas [12].

En la actualidad, hay dos opciones que nos permiten acoplar estos dos componentes.

Se puede realizar de manera vertical, donde la fibra se conecta de forma casi perpendicular al componente óptico; u horizontal, donde la fibra se conecta de forma paralela a la guía. Lo más común es utilizar grating couplers (en acople vertical) y Edge couplers (en acople horizontal). En la figura 9, vemos una representación de ambos métodos.

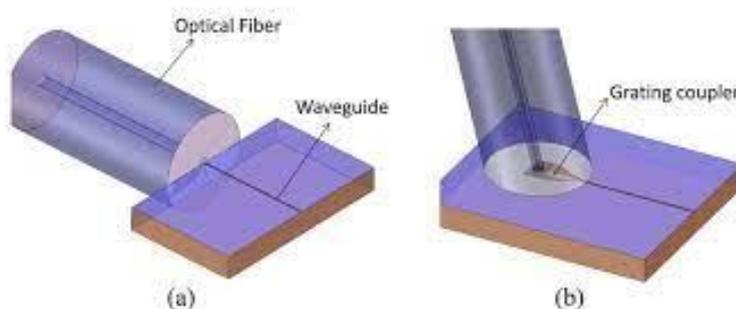


Figura 9. Técnicas de acoplamiento (a) Edge coupling y (b) Surface coupling. [13]

En nuestro trabajo, realizaremos el acople mediante la utilización de grating couplers, que son componentes muy comunes para el acoplamiento de la luz. Su funcionamiento es sencillo: la fibra se sitúa encima de esta estructura y con un determinado ángulo apunta a una rejilla, que posee una guía de onda con huecos periódicos. Su comportamiento se asemeja al de una red de difracción de Bragg, la luz se difracta y se propaga en la dirección deseada de la fibra. En la figura 10 se puede apreciar una imagen representativa sobre esta técnica. Suelen ir acompañados de un taper y, juntos, consiguen guiar y focalizar la luz en la guía monomodo. Hemos optado por esta

técnica debido a su sencilla fabricación y a su facilidad para posicionarlo e implementarlo en la superficie del chip, así como por las reducidas pérdidas de acoplamiento que se han demostrado que introduce [14].

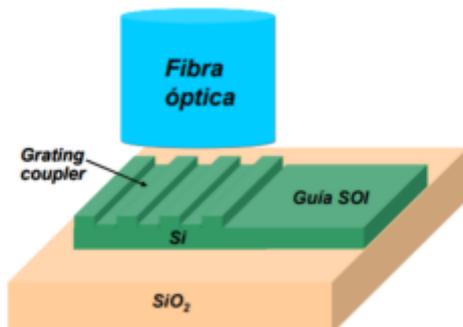


Figura 10. Acoplamiento con Grating Coupler. [12]

En nuestro diseño tendremos dos gratings asociados a cada fotodetector para su correspondiente guiado de luz. En apartados posteriores se verá con más claridad, cuando se vea la vista global del chip.

### 3.4.2 Modelos de integración

En este subapartado comentaremos cómo se realiza la integración entre la guía de onda de silicio procedente del grating y el material absorbente (Germanio, en nuestro caso) presente en el fotodetector, que nos permitirá detectar la información.

Hay dos configuraciones posibles para realizar este enlace entre guía de ondas y detector, y las vamos a enunciar a continuación:

1. Acoplamiento evanescente: podemos ver su representación en la figura 11 (a). La integración se realiza colocando el germanio directamente sobre el silicio, bien en su parte superior o en su parte inferior. Como su propio nombre indica, la luz sufre un acoplamiento evanescente desde la guía al material absorbente.
2. Acoplamiento a tope: en este modelo, el germanio y la guía se integran completamente, es decir, el material absorbente se convierte en una parte extra de la guía de ondas. Se puede ver un ejemplo en la figura 11 (b).

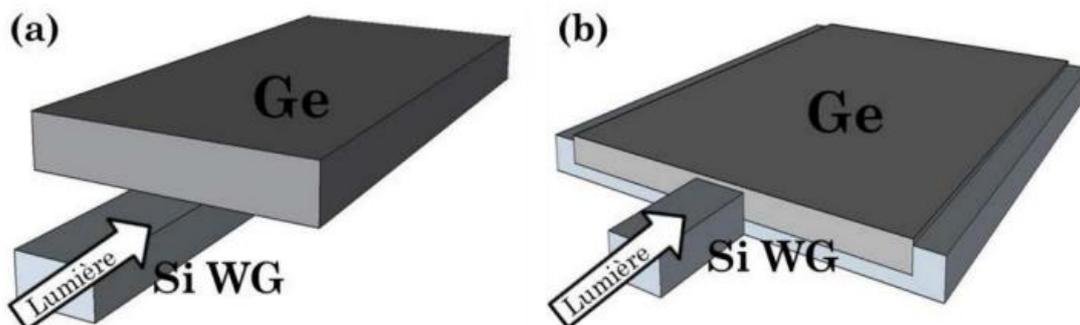


Figura 11. Tipos de integración entre guía y material absorbente en el fotodetector (a) acoplamiento evanescente y (b) acoplamiento a tope. [4]

Para presentar un acoplamiento directo efectivo, es necesario que la guía y el detector presenten el mismo modo, permitiendo así un tamaño muy reducido de material absorbente. Este caso representaría el acoplamiento con mejores prestaciones.

En nuestro caso, utilizaremos un acoplamiento del tipo evanescente, con la capa de germanio depositada encima de la guía de onda de silicio, que es el más común, debido a que presenta una fabricación más simple, un área activa considerable y compatibilidad con procesos de fabricación CMOS, a costa de presentar un ancho de banda limitado y unos valores de corriente oscura elevados [15].

### 3.5 Tipos de fotodiodos

En cuanto a la implementación de fotodetectores, existen distintas estructuras electrónicas principales que se utilizan en la actualidad. Vamos a ir analizando y explicando los distintos tipos que podemos encontrar, siguiendo un orden ascendente de menor a mayor complejidad.

#### 3.5.1 Fotodiodos PIN

Los fotodetectores PIN (p-doped, intrinsic, n-doped) son los más simples en cuanto a configuración eléctrica se refiere. Esto, junto a su bajo ruido y alta velocidad de respuesta, hacen que sean ampliamente utilizados en fotónica integrada. Sus principales limitaciones son el área activa del dispositivo y la densidad de corriente máxima que soportan. Su estructura, como su propio nombre indica, consiste en una capa de absorción intrínseca (i), que está rodeada por capas dopadas positivamente (tipo p) y negativamente (tipo n). Su funcionamiento es muy simple. Debido a la absorción de fotones, se generan pares de huecos de electrones en la capa intrínseca e impulsados por el campo eléctrico y un voltaje de polarización, se fuerza el movimiento de los huecos y los electrones que se han fotogenerado a las respectivas capas dopadas p y n, generando una corriente eléctrica proporcional a la intensidad de luz incidente, que se puede medir como una señal de detección.

Para maximizar el ancho de banda de estos dispositivos y su eficiencia, será necesario encontrar un equilibrio adecuado entre el tiempo de tránsito y RC, así como elegir unas dimensiones óptimas de la región intrínseca y otros parámetros. En la figura 12, podemos observar una representación del producto de ancho de banda y eficiencia, en función del grosor de la región intrínseca y la longitud del fotodiodo, parámetros que también analizaremos nosotros al hacer la caracterización de nuestro chip. Se puede apreciar cómo, al variar estos parámetros, la respuesta del fotodetector varía considerablemente.

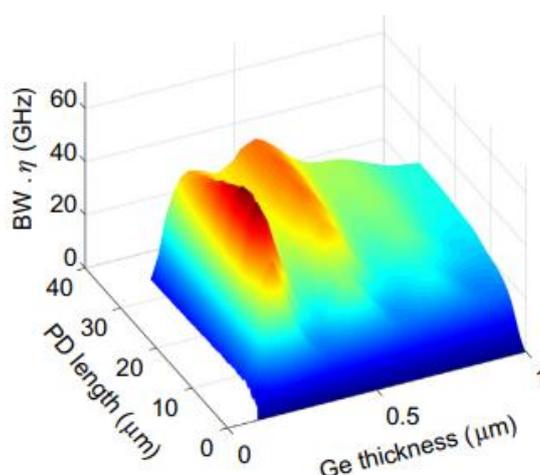


Figura 12. Producto de ancho de banda y eficiencia en función de longitud y grosor de región intrínseca. [2]

Su mayor problema es que tienen ciertas limitaciones en cuanto a la potencia de salida en aplicaciones de alta potencia. Estas limitaciones están relacionadas con el área activa del dispositivo y la densidad de corriente máxima que la sección transversal puede llegar a soportar antes de que se produzca un colapso en el campo interno. Se ha comprobado que, en términos de dimensiones y tensión de polarización iguales, el fotodetector PIN de Si/Ge tiene un rendimiento ligeramente superior en cuanto al manejo de potencia con respecto a otros materiales.

Se han demostrado gran cantidad de dispositivos que consiguen proporcionar un buen rendimiento. La mayoría consiguen obtener un rendimiento en torno a los 25 GHz de ancho de banda, llegando a alcanzar un máximo de 27 GHz [16]. Ha sido bastante complicado aumentar el ancho de banda de estos dispositivos acoplados verticalmente en Si/Ge por encima de los 30 GHz, debido a que no se conseguía mantener una alta eficiencia.

Los mayores anchos de banda para fotodetectores PIN han sido demostrados para diseños con acoplamientos a tope ultra compactos. Debido a que estos dispositivos presentan un tamaño muy pequeño, poseen una capacitancia muy reducida y que es independiente de las dimensiones de la región intrínseca, pueden utilizar regiones intrínsecas muy finas que reducen el tiempo de tránsito y el voltaje.

### **3.5.2 Fotodiodos MSM**

Los fotodetectores MSM (Metal-Semiconductor-Metal) también tienen un proceso de fabricación simple, debido a que no es necesario dopar las capas de los extremos. Están formados por una estructura que consta de dos electrodos metálicos, que están separados por un área semiconductor. Su principal diferencia con los fotodetectores de tipo PIN es la posibilidad de generación de portadores cerca de la superficie del dispositivo, no dependiendo únicamente de la absorción intrínseca de la luz en la región semiconductor.

Utilizan un diseño formado por una sección transversal, que presenta una menor capacitancia por unidad de área, debido a que la región de agotamiento solo ocupa una fracción del área del dispositivo. Como consecuencia de esto, la densidad de corriente de saturación disminuye y se consigue obtener anchos de banda más elevados de hasta 40 GHz [17].

Existe también la posibilidad de utilizar este tipo de estructuras en avalancha, con una polarización baja, lo que conlleva una mejora importante de la sensibilidad, manteniendo un gran ancho de banda de 30 GHz [18].

### **3.5.3 Fotodiodos APD**

El funcionamiento de los fotodetectores APD (avalanche photodiode) es algo más complejo que los mencionados anteriormente. Se diferencia de los ya nombrados MSM y PIN en que se benefician del efecto multiplicativo de un diodo trabajando en régimen de avalancha, presentando cierta ganancia efectiva y consiguiendo así amplificar la corriente generada. Se considera que un diodo está en régimen de avalancha cuando se aplica una tensión inversa por encima de un determinado nivel y comienza el proceso de amplificación interna de portadores, que a su vez se da cuando los portadores obtienen suficiente energía para generar pares adicionales de portadores.

Para estos fotodetectores con ganancia de avalancha, el silicio es un material muy adecuado, debido al bajo coeficiente de ionización existente, con valores inferiores a 0.1, y permitiendo así buenas prestaciones de producto de ancho de banda y ganancia, así como reduciendo el exceso de ruido. Se han demostrado gran cantidad de dispositivos, obteniendo anchos de banda de hasta 20 GHz [19]. Debido a que en nuestro proyecto intentábamos obtener valores de ancho de banda elevados, hemos optado por descargar este tipo de configuración de fotodetector.

### **3.5.4 Fotodiodos UTC**

Los fotodetectores UTC (uni-travelling-carrier) son una variante de los fotodetectores PIN ya comentados, creada para mejorar su velocidad y su eficiencia sin disminuir el área activa del dispositivo. El término "viaje único" se debe a que el transporte de electrones minoritarios a través

del absorbedor y el colector es la principal causa del tiempo de tránsito. Los portadores fotogenerados en el absorbedor se mueven hacia el colector mediante una combinación de difusión y deriva. El absorbedor está dopado para producir un pequeño campo eléctrico y reducir el tiempo de tránsito. Los electrones que se inyectaron en el colector forman una corriente de deriva y se recolectan en el contacto n. Estos detectores funcionan mejor cuando están boca arriba, a diferencia de los diodos PIN en Si/Ge.

Su absorción se lleva a cabo en una capa dopada y los portadores son recogidos en una empobrecida capa de silicio. Esto facilita la elección del espesor de germanio para un acoplamiento óptimo de la guía de onda de silicio, sin afectar la capacitancia.

Son una tecnología prometedora y se utilizan en fotónica de microondas y aplicaciones de comunicaciones coherentes, debido a que son capaces de generar una fotocorriente muy elevada y mayores anchos de banda, llegando a alcanzar valores de 40 GHz. En la figura 13 podemos observar una gráfica que representa productos de eficiencia y anchos de banda, en función de la longitud del dispositivo. En ella se comparan los valores de fotodetectores PIN y UTC, y se aprecia fácilmente que el fotodetector UTC consigue mejores prestaciones en casi todo el rango de longitud del dispositivo.

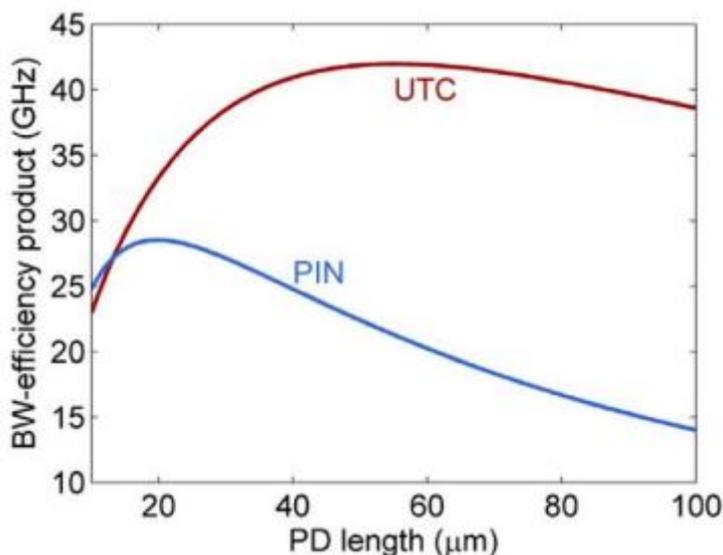


Figura 13. Producto de ancho de banda y eficiencia en función de longitud del fotodetector. [2]

Se ha podido comprobar que los fotodetectores UTC presentan un mejor rendimiento, aunque debido a su mayor complejidad y a que aún siguen en desarrollo no son ampliamente utilizados en comparación con los PIN y APD.

## 4. Fotodiodos de germanio sobre silicio

Tras exponer las bases teóricas y las características de la fotónica integrada y de los fotodetectores en particular, empezamos con la parte esencialmente práctica de nuestro proyecto.

A continuación, procederemos a explicar los parámetros de diseño de los fotodiodos fabricados, el prototipo de chip diseñado en el que se encontrarán todos integrados y las diferentes pruebas que se han realizado para comprobar el funcionamiento de estos dispositivos.

### 4.1 Parámetros de diseño

A la hora de diseñar nuestros 102 fotodiodos, se han tenido en cuenta los siguientes 5 parámetros:

1. **Espesor del Substrato (HSi):** se corresponderá con la altura del silicio que utilizaremos. Lo denominaremos en los distintos dispositivos como H[altura], donde altura será el valor de este espesor. Dependiendo de su valor, puede coincidir con 3 tipos de substratos que procederemos a enumerar.
  - **Guía de onda ‘slab’:** El espesor del substrato tendrá un valor de 70 nm.
  - **Guía de onda ‘grating’:** El espesor del substrato tendrá un valor de 150 nm.
  - **Guía de onda ‘strip’:** El espesor del substrato tendrá un valor de 220 nm.
2. **Longitud de Germanio (L<sub>Ge</sub>):** la longitud del germanio podrá tomar cuatro valores distintos y se nombrará de la siguiente forma L [Longitud], donde dependiendo del fotodiodo, la longitud del germanio tomará los valores 10,20,30 y 40  $\mu\text{m}$ .
3. **Ancho de Germanio (W<sub>Ge</sub>):** el ancho del germanio podrá tomar dos valores distintos y se nombrará de la siguiente forma G[Ancho], donde dependiendo del fotodiodo, el ancho del germanio tomará los valores de 3 o 5  $\mu\text{m}$ .
4. **Ancho de la región intrínseca (W<sub>I</sub>):** El ancho de la región intrínseca del dispositivo podrá tomar también cuatro valores distintos y se nombrará de la siguiente forma I[ancho], donde dependiendo del fotodiodo, el ancho de la región intrínseca tomará los valores 0, 500, 750, 1500 nm.
5. **Ancho de la guía de onda (W<sub>wg</sub>):** El ancho de la guía de onda tomará también cuatro valores que podrán o no coincidir con los valores del ancho de la región intrínseca, se nombrará de la siguiente forma W[ancho], donde dependiendo del fotodiodo, el ancho de la guía de onda podrá tomar los valores 500, 750, 1000, 1500 nm.

Tras la explicación de todos estos parámetros, ya somos capaces de identificar cada uno de los fotodetectores existentes mediante una línea de texto. A modo de ejemplo, si quisiéramos identificar un fotodetector con un espesor de substrato de tipo slab, ancho de germanio de 3  $\mu\text{m}$ , longitud de germanio de 10  $\mu\text{m}$  y un ancho de región intrínseca y de guía de onda de 500 nm, podremos referirnos a este dispositivo de la siguiente forma: “H70\_G3\_L10\_I500\_W500”.

A continuación, vamos a observar dos imágenes que nos ayudarán a comprender la ubicación de estos parámetros en nuestro dispositivo y la estructura general de nuestro fotodetector. La primera de ellas es la figura 14, en la que se muestra un corte transversal realizado sobre nuestro fotodiodo, y en la que podemos apreciar algunos de los parámetros anteriormente nombrados, entre los que se encuentran el espesor del substrato, el ancho del germanio y el ancho de la región intrínseca. A su vez, también se pueden apreciar los electrodos que contendrán los pads sobre los que insertaremos nuestras puntas de estática y RF, proceso que explicaremos detalladamente cuando hablemos del proceso de medida.

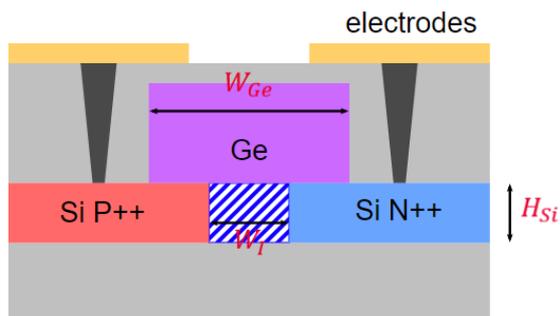


Figura 14: Corte transversal de nuestros fotodiodos con su estructura general.

En la segunda imagen (Figura 15), se pueden apreciar el resto de los parámetros que no aparecían en la figura anterior: la longitud del germanio y el ancho de la guía de onda. Esta imagen ha sido obtenida gracias al software “Klayout”, que nos ha servido de utilidad para cargar la vista global del chip e identificar los distintos fotodiodos. Para identificar estos fotodiodos, íbamos quitando capas de la vista global y midiendo con la regla las distintas medidas de los parámetros de diseño, para encontrar el fotodiodo específico y comprobar que sus dimensiones eran las correctas.

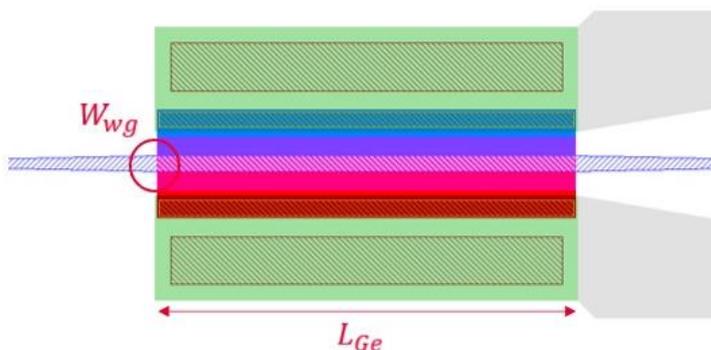


Figura 15: Vista capas del fotodiodo mediante el software “Klayout”.

## 4.2 Chip a caracterizar

En primer lugar, se mostrará el chip sobre el que se trabajará, que se puede visualizar en la figura 16. En él podemos encontrar 102 fotodiodos, que han sido diseñados con distintas medidas en sus parámetros, con el fin de comprobar las prestaciones de cada uno y de ver cómo afectan los diferentes parámetros de diseño en el rendimiento de los dispositivos.

En esa misma figura, hemos realizado algunos apuntes y recuadros con distintos colores para facilitar la comprensión de la distribución de los dispositivos en el chip global. Si consideramos el chip como una matriz, presenta once columnas de fotodetectores. En las cuatro primeras, podemos encontrar a su vez once filas, mientras que en el resto de las columnas solo existe una. Cada elemento estará formado por dos fotodetectores, situándose uno encima del otro, debido a que primero se medirán la mitad de los fotodetectores y luego le daremos la vuelta para medir el resto debido a la posición de sus gratings. Esto simplificará y acelerará el proceso, ya que no habrá que alinear la fibra en todas las direcciones a la hora de realizar las mediciones.

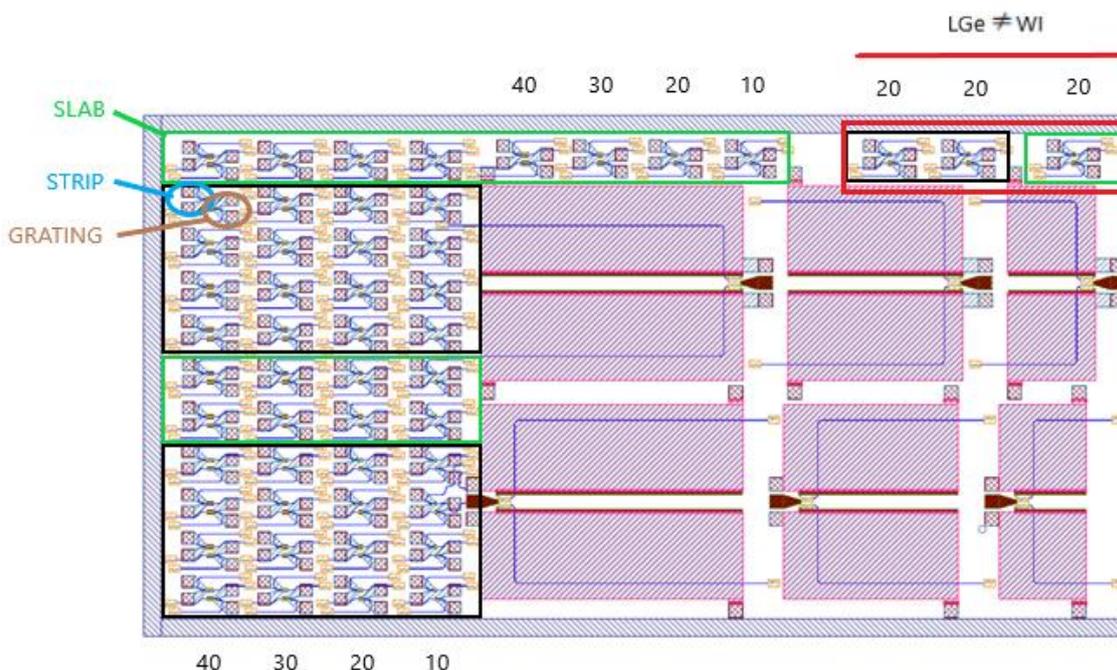


Figura 16: Vista del Chip Global

Hemos realizado la distribución de los dispositivos en el chip de la siguiente manera:

- **Espesor de sustrato:** hay 32 dispositivos para cada valor de grosor, siendo los recuadros verdes los dispositivos slab, que se sitúan en las filas 1, 6 y 7. Los dispositivos con sustrato strip y grating se encuentran rodeados por un cuadro negro y se distribuyen en las filas 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10 y 11. En estos recuadros negros podremos encontrar dos tipos de sustrato: los de tipo strip, que podemos ver un ejemplo rodeado de azul y serán los que se encuentran en la parte superior y alinearán la fibra en su parte derecha; y los de tipo grating, que se ajustan al ejemplo rodeado de color marrón y serán los que se encuentren en la parte inferior y alinearán la fibra en la parte izquierda.
- **Espesor de germanio:** la mitad de los dispositivos serán de germanio  $3\ \mu\text{m}$  y la otra mitad de germanio  $5\ \mu\text{m}$ .
- **Longitud de germanio:** estará especificado en la parte superior e inferior de las columnas el valor de la longitud de germanio de los dispositivos, encontrando 24 dispositivos para cada longitud.
- **Ancho de la región intrínseca y Ancho de guía de Onda:** un 75% de los dispositivos presentarán un ancho de la región intrínseca y un ancho de guía de onda común, mientras que el resto de los dispositivos tendrán un valor de ancho en región intrínseca igual a cero y un ancho de guía de onda de  $1000\ \text{nm}$ .
- **Fotodetectores Especiales:** en las columnas 9, 10 y 11 hemos marcado los dispositivos con un recuadro rojo, ya que son especiales y distintos a todos los demás, porque la longitud del germanio no coincide con la región intrínseca del dispositivo. En este recuadro podemos encontrar dos dispositivos de cada tipo de sustrato con una longitud de  $20\ \mu\text{m}$  y unos anchos de región intrínseca y ancho de guía de onda distintos.

También se pueden apreciar en la parte central de la imagen algunos dispositivos empaquetados alejados de los demás, que se corresponden con los dispositivos convencionales de Huawei. De estos, podemos comprobar su rendimiento, pero no conocemos las medidas de sus parámetros. A la hora de mostrar los resultados de funcionamiento de estos dispositivos, los llamaremos “default”.

## 5. Metodología y Materiales

En este apartado, vamos a explicar cuál va a ser el método que vamos a aplicar en nuestra investigación y por qué. Además, vamos a exponer los materiales que se van a utilizar para realizar los distintos experimentos y recopilar distintos datos acerca de nuestra investigación.

### 5.1 Metodología

Consideramos que el método experimental es el más adecuado para nuestro trabajo, ya que parte de unas premisas generales, para después extraer una conclusión derivada necesariamente de ellas. En nuestro caso, este proceso se realizará a través de la experimentación y el análisis de los datos obtenidos, para después manipular variables independientes en un entorno controlado y medir los efectos en las variables dependientes.

Es muy importante conocer el método que abarca nuestro trabajo, ya que esto nos ayuda a saber cómo se estructura y de qué forma lo hemos hecho. En nuestro caso, se ha comenzado por la recopilación y búsqueda de datos relacionados con la fotónica en general, para después ir profundizando poco a poco en nuestro tema a tratar, la fotodetección. El siguiente paso será experimentar con todos los fotodetectores fabricados y visualizar cómo influyen los distintos tipos de parámetros físicos en el rendimiento, este será medido según los niveles de fotocorriente, ancho de banda y diagrama de ojos de los fotodetectores, para finalmente analizar cuáles de estos serían los óptimos y formular una conclusión.

### 5.2 Materiales

Los materiales que vamos a necesitar para poder realizar nuestro trabajo los dividiremos en dos bloques. El primero de ellos será el software, utilizado para realizar tanto las simulaciones en el laboratorio como la visualización y análisis de datos. El segundo y último bloque será el hardware, es decir, la instrumentación física utilizada en el laboratorio para el desarrollo del proyecto.

#### 5.2.1 Software Necesario

Este subapartado está formado por los programas informáticos utilizados para las distintas fases del desarrollo del proyecto, y son los siguientes:

- Klayout: utilizado para examinar el chip fabricado y comprobar los distintos parámetros físicos de los fotodetectores, para así poder identificar cada uno de ellos.
- Excel: herramienta muy eficaz para obtener información mediante el análisis de la enorme cantidad de datos de los fotodetectores que se tienen.
- Matlab: plataforma de programación y cálculo numérico necesaria para la creación de scripts que ejecutarán las distintas simulaciones para la recopilación de datos de los fotodetectores.

#### 5.2.2 Hardware Necesario

Instrumentación diseñada para investigación y desarrollo de dispositivos y sistemas ópticos basados en fotónica integrada, entre ellos: fuentes de luz, componentes y dispositivos fotónicos y equipos para el análisis y medida de las propiedades de los fotodetectores. En este apartado, solo hablaremos sobre los elementos comunes en los distintos setups realizados en el laboratorio. Será en cada apartado específico donde nombremos los materiales que ha sido necesario añadir.

- Mesa de montaje óptico: es una mesa diseñada para pruebas y experimentos ópticos. Está compuesta de materiales de alta calidad que reducen las vibraciones, algo fundamental a la hora de trabajar con estas tecnologías, ya que una pequeña vibración puede alterar nuestro resultado a la hora de realizar las mediciones. Como se puede apreciar en la figura 17, la mesa también presenta huecos redondos en su parte superior, que facilitan el montaje de soportes para el experimento.

- Estación de pruebas: diversas plataformas para sostener los instrumentos que participan en la medición de forma precisa, como podrían ser el chip, la fibra o las puntas que se insertan en los pads. Estos soportes están altamente imantados, al igual que la mesa óptica, lo que hace que el montaje sea muy estable y no se produzca ningún movimiento en ninguna de las plataformas que participan en la medición. Los soportes tienen roscas que les permiten desplazarse en tres ángulos de libertad (x,y,z), permitiendo así el completo acceso a todas las zonas del chip, tanto por parte de la fibra como de las puntas. En la figura 17, se observan algunos de los soportes utilizados, entre ellos el de la fibra óptica y el del chip. En este último, también se puede apreciar que presenta un hueco en el centro, utilizado para succionar el chip que será colocado encima mediante aire procedente del tubo azul que se ve en la parte superior de la imagen, garantizando que el chip no sufra ningún tipo de movimiento al realizar los contactos y mediciones sobre él.

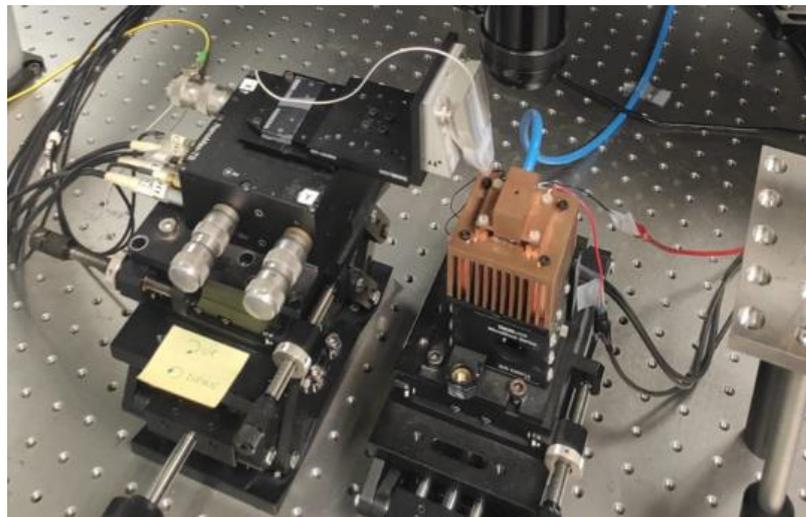


Figura 17. Probe Station utilizada para la caracterización de los fotodetectores.

- Fuente de luz de fibra de alta intensidad: Es un componente esencial, ya que proporciona luz a nuestro circuito fotónico integrado. Podemos ver una imagen del componente en la figura 18.



Figura 18. Fuente de luz de fibra de alta intensidad de THORLABS (OSL2).

- Microscopio: la fuente de luz va conectada a este microscopio, que emite la luz y lleva incorporado varias lentes para ampliar y enfocar la imagen del chip. Todo el dispositivo tiene que estar alineado con el chip, y esto se realiza a través de un joystick incorporado

en la mesa que nos permite mover el elemento en dos grados de libertad, horizontal y vertical. El modelo es un *Optem 125* (figura 19).



Figura 19. Microscopio Optem 125.

- Pantalla: en el televisor se retransmite la imagen enfocada y alineada de nuestro chip obtenida con el microscopio, hecho que nos será de gran utilidad para ir recorriendo todo el banco de fotodetectores y realizando las medidas oportunas. Debido a que el chip tiene unas dimensiones muy pequeñas, necesitamos observar en todo momento la pantalla, para visualizar una versión ampliada de nuestro chip gracias a las lentes comentadas anteriormente. Estos elementos son muy importantes, ya que sin ellos sería imposible alinear la fibra en los gratings o hacer contacto con las puntas en los pads de cada fotodetector sin dañar el chip.
- Láser: su rol es de vital importancia para nuestro setup, debido a que suministra una fuente de luz controlada y precisa necesaria para la caracterización de nuestros fotodetectores. Utilizaremos dos tipos de láseres en nuestro proyecto, uno de ellos para cada configuración, como veremos más detalladamente en los siguientes apartados.
- Fibra óptica: se utilizan cables de fibra monomodo que cuentan con conectores FC/APC en sus extremos. Es el elemento que guiará la luz desde el láser hasta nuestro chip, y que proporcionará una conexión óptica fiable y eficiente garantizando unas medidas precisas. El setup también presenta unos moduladores que permiten convertir la polarización entre diversos estados (lineal, circular y elíptico). Esto se consigue enrollando la fibra alrededor de bobinas para crear placas de onda independientes, que consiguen alterar la polarización de la luz. Será necesario ajustar correctamente estos controladores para facilitar la caracterización de los fotodetectores y obtener unas mediciones en condiciones óptimas. En la figura 20 se aprecia la entrada y la salida de la fibra por los polarizadores.

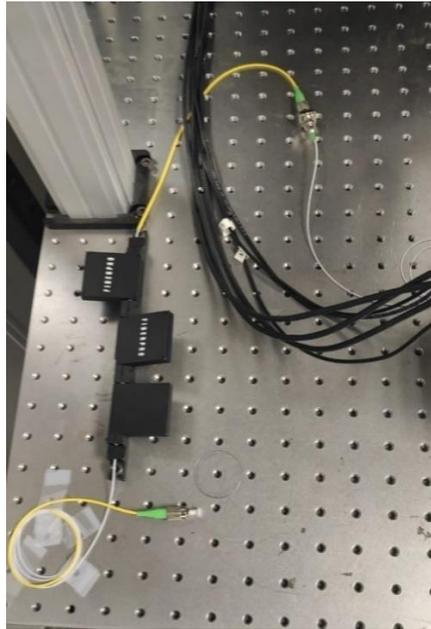


Figura 20. Entrada y salida de la fibra por los moduladores de polarización.

- Puntas de conexión: utilizaremos puntas muy finas y delgadas que nos permitirán realizar contacto eléctrico con los pads de cada fotodetector sin dañarlos. Será necesario utilizar un tipo de puntas distinto para cada configuración realizada. En apartados posteriores, se explicará y mostrará cada uno de estos tipos de puntas según su condición, ya sea estática o radiofrecuencia.
- Fuente de tensión y amperímetro: utilizaremos el dispositivo Keithley 2400 Series SourceMeter, que nos permite establecer una fuente de voltaje al circuito y a la vez medir la fotocorriente generada a través de las puntas de contacto que acabamos de mencionar. En la figura 21, podemos apreciar una imagen del dispositivo en cuestión.



Figura 21. Dispositivo Keithley 2400 series SourceMeter.

- Controlador térmico: dispositivo conectado a las puntas de conexión utilizado para controlar la temperatura soportada. Presenta cuatro conexiones: dos de ellas son Negative Temperature Coefficient (NTC), que se encargan de obtener la temperatura del dispositivo y del entorno; mientras que las otras dos son Thermoelectric Cooler (TEC), y su función es aplicar la corriente eléctrica adecuada para enfriar o calentar el dispositivo según las necesidades del diseño.
- Cámara frontal: otro elemento común del que disponíamos en ambos setups era una cámara frontal, para ayudarnos a comprender las alturas de los componentes en el proceso



de medición. Solo la utilizamos con el primer fotodetector medido, ya que luego nos familiarizamos bastante rápido con las distancias y dejamos de utilizar este elemento.

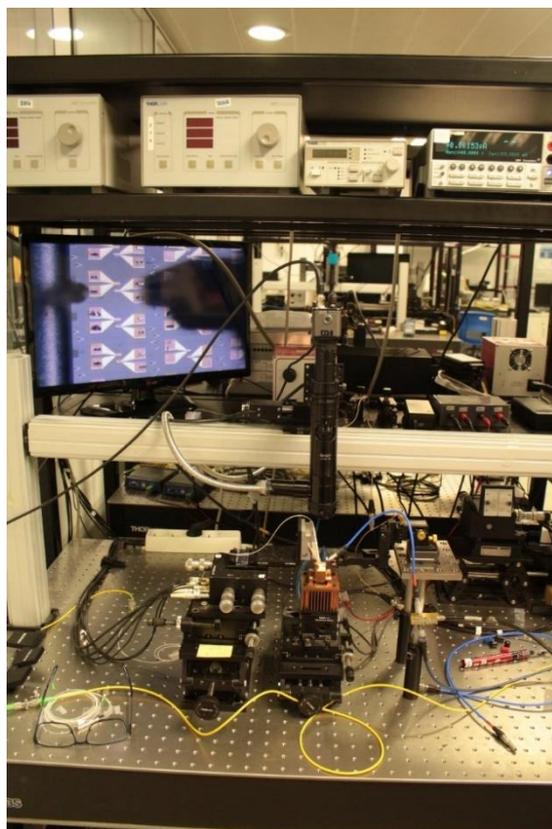
- Cámara (Canon PowerShot SX210): para la realización de fotos de los distintos setups en el laboratorio.

## 6. Resultados

Tras explicar la vista global del chip y todos sus parámetros, así como la metodología utilizada con los correspondientes materiales comunes en ambos setups, procederemos a explicar los diseños de montaje, el proceso de medida y los resultados obtenidos en cada una de las configuraciones realizadas.

La primera configuración fue en estática, y medimos la fotocorriente de todo el banco de fotodetectores al completo. Después, escogimos los dispositivos con mejores prestaciones y los analizamos en condiciones de radiofrecuencia (segunda configuración – RF), obteniendo su ancho de banda. Para terminar, mostraremos los diagramas de ojo de estos dispositivos variando el bitrate y el voltaje de polarización suministrado.

Todo el desarrollo experimental del trabajo lo hemos realizado en el laboratorio del Photonics Research Lab (PRL), que es el área de investigación destinado a fotónica dentro del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM). En él, trabajaremos en un setup específico, diseñado en particular para nuestra labor de caracterización de fotodetectores. Podemos apreciar una foto general del entorno en el que se ha trabajado a continuación (Figura 22).



**Figura 22.** Setup utilizado en el laboratorio para la caracterización de los fotodetectores.

Debido a que participaban muchos elementos en el setup, en la fotografía no se ven todos, pero se pueden apreciar los elementos comunes en ambas configuraciones. A continuación, veremos cómo ajustamos este setup para alcanzar los escenarios de estática y RF deseados.

## 6.1 Medidas en estática

Vamos a comenzar hablando sobre las medidas realizadas en condiciones de estática, es decir, cuando analizamos el comportamiento de la respuesta de los dispositivos en un estado carente de cambios rápidos y de bajas frecuencias. Procederemos a nombrar qué instrumentos específicos fueron utilizados para alcanzar las condiciones de estática.

Como ya comentamos anteriormente, utilizaremos láseres distintos en cada una de las configuraciones. En este caso, el elegido será un láser de cavidad externa sintonizable de alto rendimiento, como vemos en la imagen de la figura 23. Destaca, entre otras cosas, por su capacidad de ajustar y configurar la longitud de onda emitida, así como por su potencia de salida para controlar la potencia de la luz, cualidades que serán necesarias para calcular dos de los tres escenarios que nos planteamos en este apartado, y que comentaremos en detalle más adelante.



Figura 23. Láser sintonizable Tunicis-T100R.

También será necesario utilizar puntas de conexión distintas en cada configuración. En condiciones de estática, podemos ver una foto del diseño utilizado en la figura 24. Utilizaremos dos puntas con soportes independientes y tres grados de libertad, permitiendo así una correcta inserción en los pads de los fotodetectores.

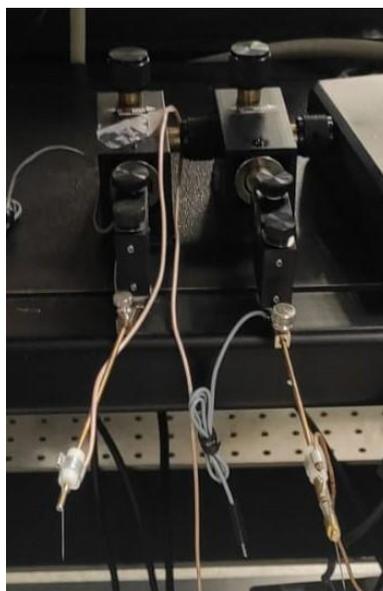


Figura 24. Puntas de conexión en condiciones de estática.

Dicho esto, tenemos finalmente todos los elementos que participaran en el setup de estática, por lo que procederemos a explicar cómo hemos realizado el proceso de medición de los fotodetectores. Se divide en dos partes, una de ellas totalmente manual y otra automatizada por medio de software.

En la medición manual tendremos que ajustar todos los elementos con el dispositivo en cuestión a medir. Esto se hará gracias a los soportes con distintos grados de libertad, que nos permitirán ir desplazándonos por el banco de fotodetectores para garantizar una conexión óptima. Al estar trabajando con tecnología de tamaño muy reducido, deberemos tener mucho cuidado en el proceso para no dañar el chip o los fotodetectores. Procederemos de la siguiente manera:

1. Nos aseguraremos de que todos los dispositivos están encendidos y correctamente configurados y calibrados. También estableceremos los valores iniciales de los instrumentos. La fuente tendrá un voltaje de  $-1V$  y el láser una potencia de  $0dBm$  y longitud de onda de  $1560nm$ .
2. Identificaremos las propiedades del fotodetector que queremos medir en Klayout y ubicaremos el dispositivo en el chip.
3. Acercaremos poco a poco, y con mucho cuidado, las puntas de conexión a la ubicación del fotodetector encontrada. Iremos desplazándonos en los ejes  $x$  e  $y$  y hasta estar encima de él, con la ayuda de la pantalla y las lentes de ampliación.
4. Una vez que tenemos ubicados tanto el fotodetector como las puntas, nos desplazaremos en el eje  $z$ , acercándonos poco a poco al chip en altura y ajustando levemente los ejes vertical y horizontal hasta que haga contacto con los pads. Para identificar la distancia existente entre el chip y las puntas enfocaremos la lente al fotodetector, de forma que sea vea mucho más nítido. Al encontrarse las puntas a diferente altura, estas se verán borrosas, por lo que disminuirémos la altitud hasta que se vean de forma nítida, lo que nos indicará que se encuentran ya muy cercanas a los pads del dispositivo. Sabremos que el contacto se ha realizado cuando, al seguir disminuyendo en altura, las puntas no se muevan y se queden fijas sobre el path, y a su vez muestren un valor de intensidad coherente en el amperímetro al que van conectadas.
5. Procederemos de forma similar con la fibra. La acercaremos al grating correspondiente con el dispositivo a medir. El siguiente paso será ajustar el eje  $x$  e  $y$  para que cuadre justo encima del grating, y descenderemos en el eje  $z$  con el mismo procedimiento anterior. Cuando nos encontremos lo suficientemente cerca, deberemos identificar el momento en el que la fibra se dobla al hacer contacto con el grating, y situaremos esta justo antes de que se produzca esa curva en la punta de la fibra. Debido a que la fibra tapaná el grating, no podremos ver cuál es su ubicación óptima de inserción, por lo que nos ayudaremos del amperímetro y variaremos levemente los ejes  $x$  e  $y$  y hasta encontrar el valor óptimo. Este suceso indicará que hemos acoplado la fibra de manera correcta.
6. El último paso que realizaremos será ajustar la polarización de la fibra con los controladores. Al tener tres switches, variaremos estos de uno en uno, ajustando cada uno de ellos en el valor que genere más corriente en el amperímetro, y llegando finalmente a conseguir el valor óptimo de fotocorriente del fotodetector.

Podemos apreciar en la figura 25 una imagen donde se muestra la pantalla y todos los elementos que participan en la conexión con el circuito fotónico integrado. Las dos puntas de conexión se encuentran haciendo contacto con los pads, que son los cuadrados de color marrón, mientras que la fibra está situada encima del grating correspondiente al fotodetector.

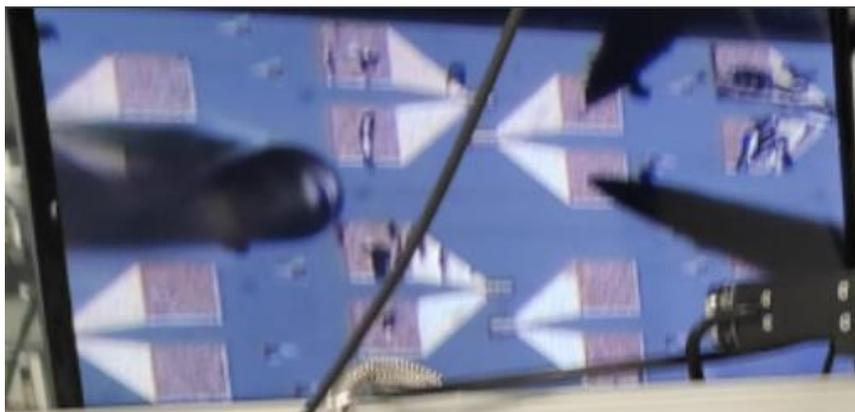


Figura 25. Pantalla ampliada con las puntas haciendo contacto y la fibra acoplada.

La segunda parte de la medición la haremos de forma automatizada. Utilizaremos un ordenador que estará conectado mediante un bus GPIB con los instrumentos que participan en la configuración, y escribiremos varios scripts en Matlab. En ellos, se configurarán todos los instrumentos del setup, dependiendo del escenario deseado. Para la realización de este paso, fue necesario observar tanto los manuales de usuario del sourcemeter Keithley 2400 [6], como del láser Tunic-T100R [7], donde se encontraban los comandos correspondientes a cada instrumento para modificar su configuración. Al lanzar la simulación, todos los elementos se ajustarán acorde a nuestras peticiones y se obtendrá una gráfica correspondiente al resultado obtenido.

Al realizar las mediciones, fuimos recopilando los valores de fotocorriente de todos los dispositivos. En la figura 26 observamos la totalidad de las medidas obtenidas.

Vamos a comentar, en primer lugar, los dos puntos que tienen un valor fuera del rango general de las medidas. El primero de ellos corresponde con el número de fotodetector 32, el “H150\_L20\_G3\_I750\_W750”, que presenta un valor muy bajo de fotocorriente, ya que se encontraba averiado, por lo que no lo tendremos en cuenta y descartaremos sus resultados a la hora de realizar cualquier análisis. El segundo punto es el dispositivo default y se encuentra al final de la gráfica. Presentaba una fotocorriente de 0,20836 mA, y fue muy positivo ver este dato, ya que nuestros fotodetectores se encontraban todos en un rango entre 0,23 mA y 0,29 mA, obteniendo el “H70\_L30\_G3\_I0\_W1000” un valor máximo de 0,287 mA. De esta manera, nuestra hipótesis inicial de desarrollar fotodetectores que mejorasen las prestaciones de los utilizados actualmente en el laboratorio empezaba a cumplirse.



Figura 26. Fotocorriente obtenida en condiciones iniciales en todos los fotodetectores.

Sabiendo que ya hemos mejorado el valor de fotocorriente del dispositivo default, vamos a identificar que parámetros de diseño son los que nos permiten obtener mejores resultados en términos globales, ya que, a simple vista, no hay ningún patrón claro que nos indique cuáles son mejores respecto a otros. Utilizaremos dos gráficas en cada parámetro: una de tipo línea, donde

podremos ver como varía la respuesta dependiendo del fotodetector; y otra de tipo caja con bigotes, que nos será de gran ayuda para identificar la distribución del conjunto de datos y resaltar características importantes como la ubicación de la mediana de los datos (representada con una línea en la caja) o los valores máximos y mínimos, que serán los extremos de los bigotes.

Comenzaremos con el grosor del sustrato. En la figura 27 aparecen ambos gráficos, y vemos que hay una gran alternancia de valores en los datos. Del gráfico con bigotes podemos obtener una interpretación clara: los valores con silicio de 70 nm tienen una respuesta más concentrada, mientras que la mejor mediana se la atribuyen los dispositivos con 220 nm. Por ello, diremos que estos son los que obtienen un mejor rendimiento.

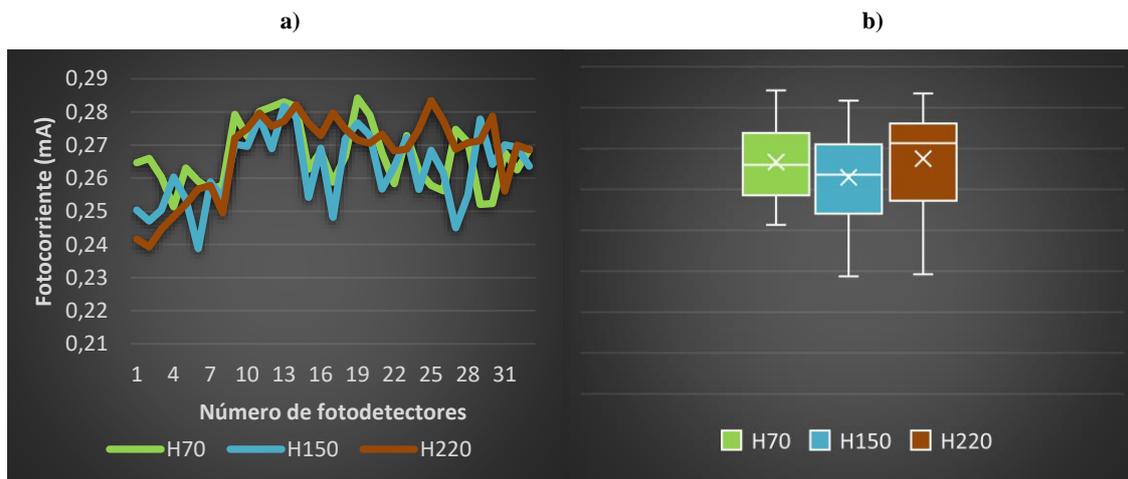


Figura 27. Fotocorriente obtenida en función del grosor del sustrato a) gráfico de línea b) gráfico de caja con bigotes.

El siguiente parámetro por analizar será la longitud del germanio. Podemos ver sus respectivas gráficas en la figura 28, observando cierta tendencia. Los dispositivos con longitud 10  $\mu\text{m}$  presentan un rendimiento inferior a los demás, incluyendo el valor mínimo. Le siguen los de 40  $\mu\text{m}$ , los de 30  $\mu\text{m}$  y por último los de 20  $\mu\text{m}$ , que son los que presentan mejores valores de fotocorriente en general. Estos últimos presentan más medidas debido a que los fotodetectores especiales son de este tipo.

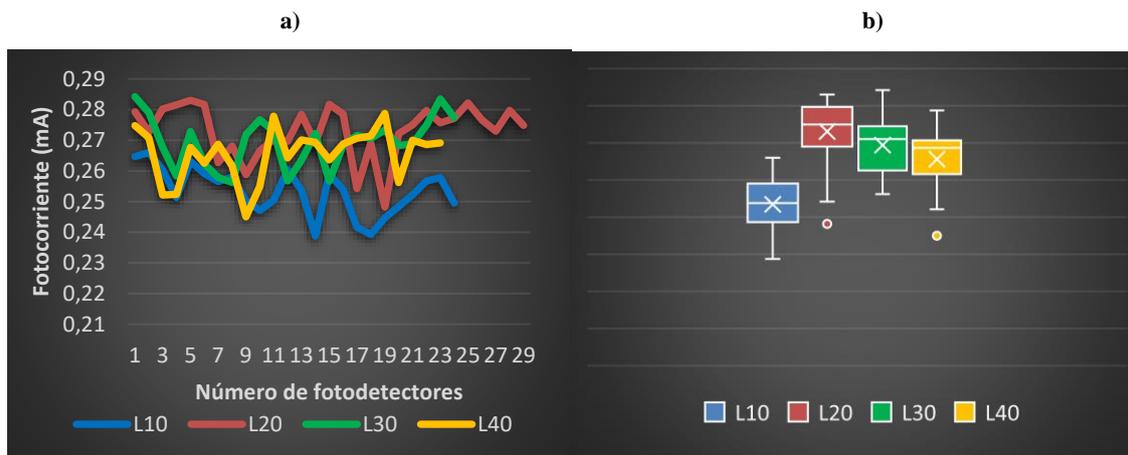


Figura 28. Fotocorriente obtenida en función de la longitud del germanio a) gráfico de línea b) gráfico de caja con bigotes.

El tercer parámetro que tendremos en cuenta será el ancho del germanio. El comportamiento de los dispositivos para los distintos valores de ancho se puede ver en la figura 29. De la misma manera que en la gráfica anterior, los dispositivos con germanio 3  $\mu\text{m}$  presentan más medidas, debido a que los dispositivos especiales existentes en el banco de fotodetectores eran de este tipo.

En este caso podemos ver que los valores son muy alternantes, aunque hay un mayor número de dispositivos de ancho de germanio 3  $\mu\text{m}$  con un rendimiento bueno.

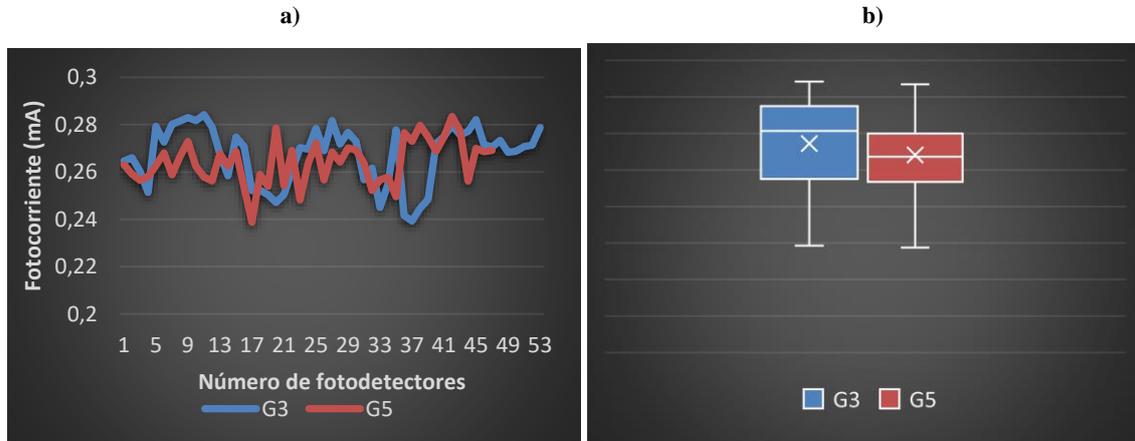


Figura 29. Fotocorriente obtenida en función del ancho del germanio a) gráfico de línea b) gráfico de caja con bigotes.

El último parámetro por analizar será el conjunto de ancho de la región intrínseca y guía de onda. Las gráficas se muestran en la figura 30, y el comportamiento es muy similar al de los anteriores parámetros. Los valores son muy dispares entre sí y no siguen un patrón claro, aunque viendo el diagrama de caja y bigotes, vemos como los valores más estables son los de los dispositivos especiales ya mencionados, seguidos de los anchos I500\_W500, I0\_W1000, I750\_W750 y I1500\_W1500, en ese orden.

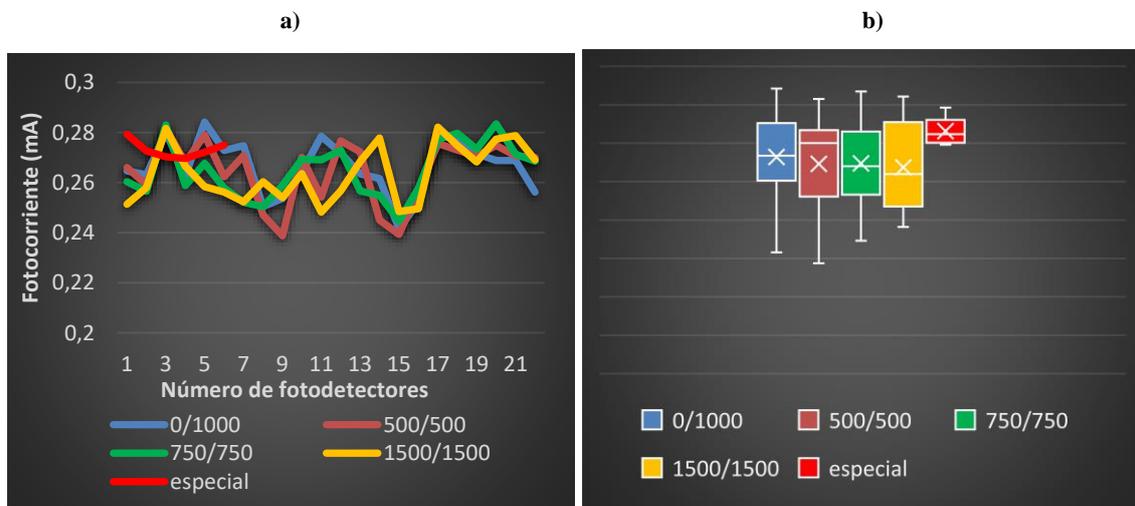


Figura 30. Fotocorriente obtenida en función del ancho de la región intrínseca y de la guía de onda a) gráfico de línea b) gráfico de caja con bigotes.

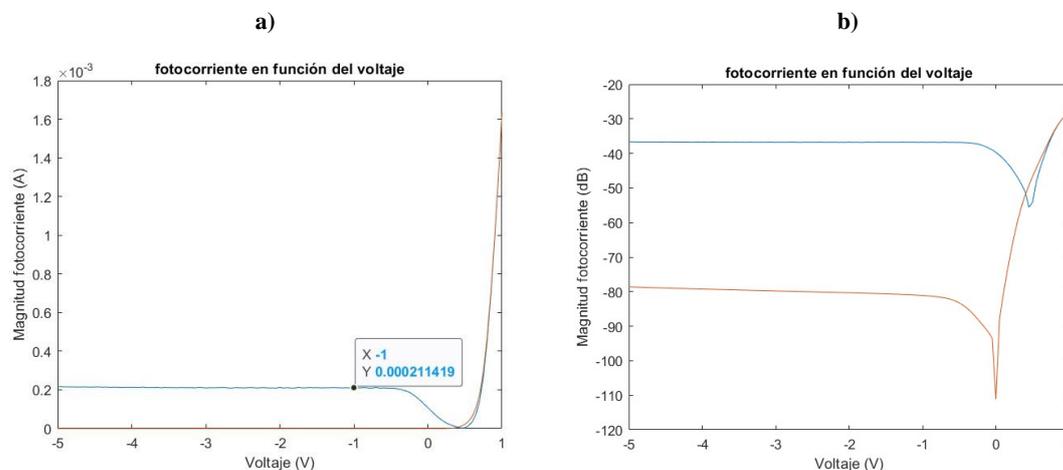
A continuación, hablaremos sobre los distintos escenarios que hemos planteado para medir la fotocorriente de cada fotodetector y los resultados que se han obtenido en cada una de las medidas, comparándolos con la respuesta del fabricante. Las gráficas serán representadas tanto en unidades lineales, donde podremos observar los valores reales de fotocorriente en Amperios, como en escala logarítmica, que será de gran utilidad para visualizar los datos de una manera más sencilla cuando tenemos valores muy reducidos o elevados de fotocorriente.

### 6.1.1 Fotocorriente en función del voltaje

En el primer escenario, estableceremos un valor de potencia y longitud de onda en el láser fijo y realizaremos un barrido en tensión desde -5V hasta 1V con un paso de 0,05 V. Se utiliza polarización inversa, debido a que esta puede ayudar a aumentar la velocidad de respuesta del

fotodetector y reducir el ruido generado. El script realizado se puede visualizar en el anexo 9.1, en el que primeramente hemos inicializado los valores de los instrumentos que no variarán, luego establecemos la comunicación con los distintos instrumentos y los configuramos acorde a nuestras necesidades, y, por último, fijamos el barrido en tensión y representamos el resultado obtenido. Utilizaremos la función “abs” sobre la fotocorriente, en todo caso, para facilitar la visualización de los datos proporcionada por la polarización inversa.

La primera medida que vamos a representar va a ser la respuesta obtenida para el dispositivo utilizado por Huawei (Figura 31). Como vemos, el fotodetector se comporta de manera esperada, es decir, a medida que aumenta el voltaje de polarización inverso, aumentan los valores de corriente. Se observa, en la gráfica de unidades lineales, como tenemos una fotocorriente bastante estable a lo largo del rango del voltaje y una corriente de oscuridad muy pequeña de alrededor de 10nA. Dicha corriente se visualiza mejor en la gráfica de unidades logarítmicas. Además, podemos visualizar como ambos valores tienen una débil dependencia con respecto al voltaje, ya que con pocos voltios la corriente tiende a estabilizarse. Esto se traduce en que el campo eléctrico presente es suficiente para extraer la mayoría de los portadores fotogenerados.



**Figura 31. Fotocorriente en función de voltaje en dispositivo default a) Unidades lineales b) Unidades logarítmicas.**

Ahora procederemos a hablar de las respuestas de nuestros dispositivos, que se asemejan mucho a la forma obtenida en el dispositivo default. Por ello, únicamente vamos a mostrar el único dispositivo de ellos que presentaba una respuesta distinta y que, a su vez, aportaba un buen valor de fotocorriente. El elegido ha sido el “H220\_L20\_G3\_I0\_W1000”. Sus gráficas pueden ser visualizadas en la figura 32, donde vemos que la corriente de oscuridad se comporta de forma distinta, aumentando su valor de forma considerada conforme aumenta el voltaje de polarización inversa, debido a que el dispositivo carece de región intrínseca. Así, se permitirá una mayor generación-recombinación y movilidad de portadores de carga.

También podemos observar en las gráficas, en relación con las del dispositivo default, que la dependencia con el voltaje en la fotocorriente se reduce, contemplando una estabilización de dicha fotocorriente con un voltaje de 0 V.

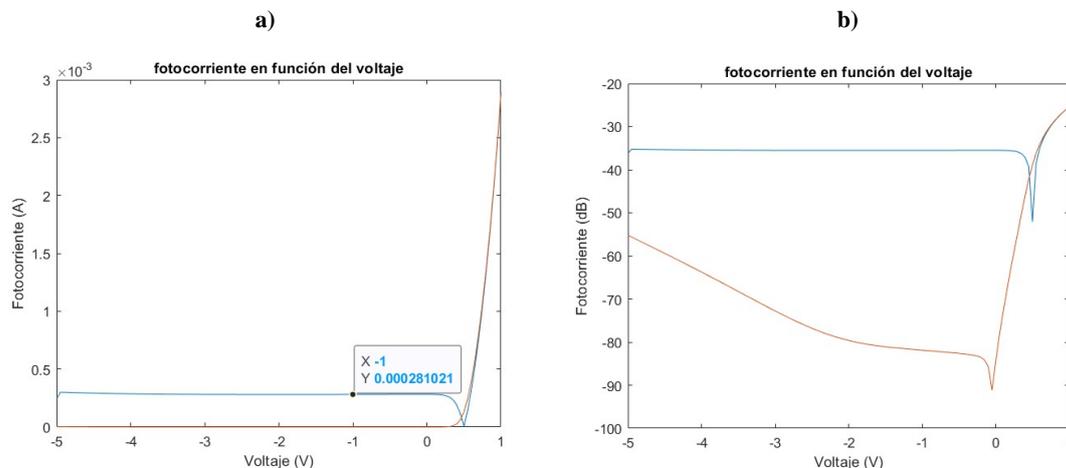


Figura 32. Fotocorriente en función de voltaje en dispositivo “H220\_L20\_G3\_I0\_W1000” a) Unidades lineales b) Unidades logarítmicas.

### 6.1.2 Fotocorriente en función de la potencia

En el segundo escenario, mantendremos el voltaje suministrado y la longitud de onda con un valor fijo y realizaremos un barrido en la potencia de salida del láser desde -6 dBm hasta 11 dBm, con un paso de 0,1 dBm. Procederemos de igual manera que en el subapartado anterior, y el script será bastante parecido. Solo cambiaremos la parte del barrido. Como vemos en la figura 33, la respuesta obtenida en el dispositivo default es coherente con el comportamiento esperado por el fotodetector, ya que al aumentar la potencia de salida del láser se generan más portadores y la fotocorriente generada aumenta. En unidades lineales, vemos una respuesta exponencial con un valor de 0,208363 mA a 0 dBm y de 1,912 mA a 11 dBm. Por otro lado, en unidades logarítmicas, podemos apreciar cómo se empieza a saturar la respuesta al llegar a valores alrededor de 8 dBm.

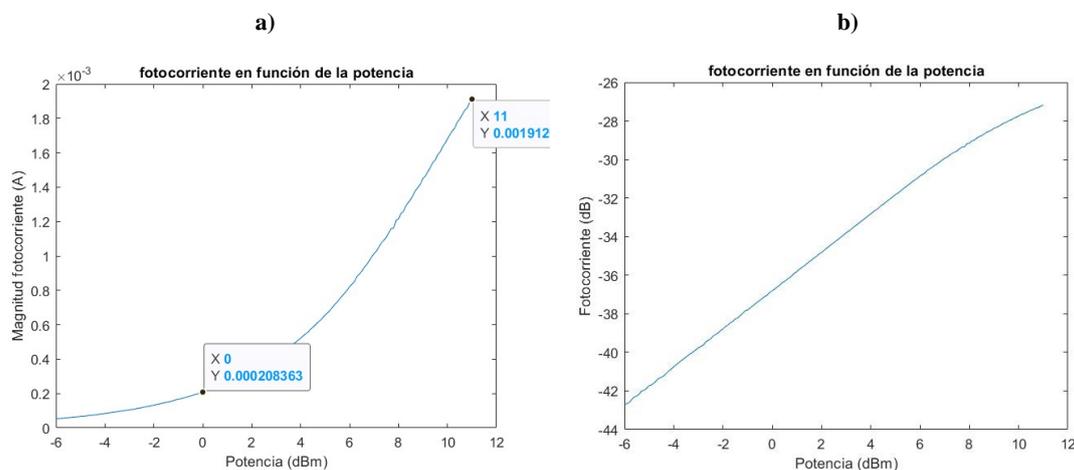
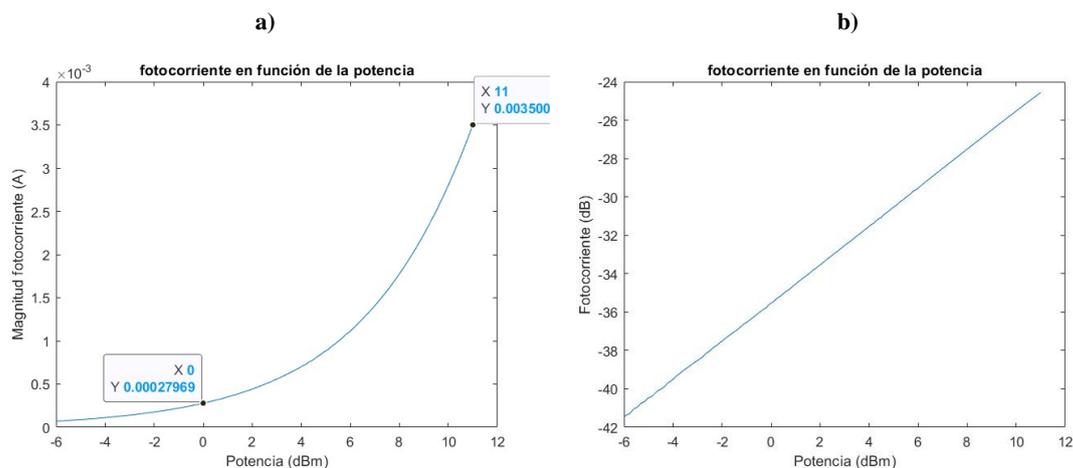


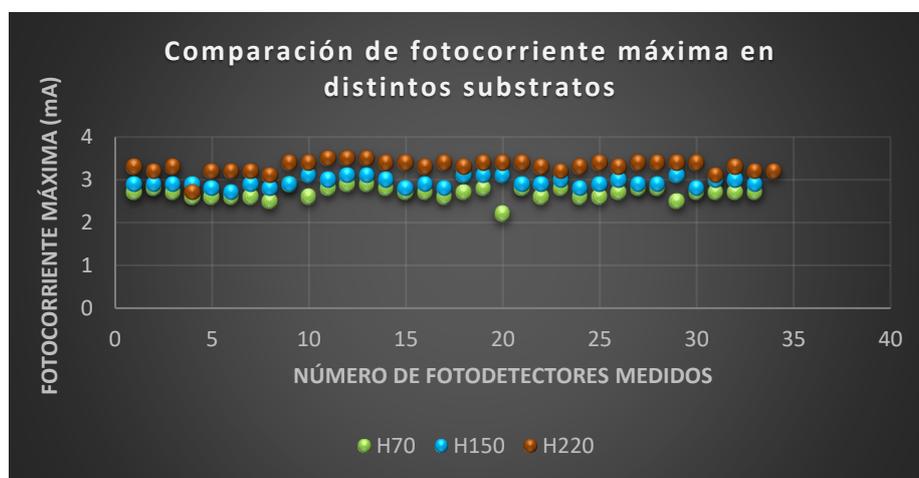
Figura 33. Fotocorriente en función de la potencia de salida del láser en dispositivo default a) Unidades lineales b) Unidades logarítmicas.

En contraste con lo anterior, vamos a mostrar en la figura 34 la respuesta del fotodetector con mejor rendimiento, donde se apreciará un mayor valor de fotocorriente en las gráficas, así como una menor saturación en altas potencias de salida del láser. En unidades lineales de fotocorriente podemos ver, en los markers, como el valor en 0 dBm ha aumentado bastante de 0,208363 mA a 0,27969 mA, y en su valor máximo a 11 dBm hemos pasado de 1,9 mA a 3,5 mA. En la versión logarítmica, podemos ver como el efecto de saturación que se producía en el dispositivo default desaparece completamente, obteniendo una mejor respuesta.



**Figura 34. Fotocorriente en función de potencia de salida del láser en dispositivo “H220\_L20\_G3\_I0\_W1000”**  
a) Unidades lineales b) Unidades logarítmicas.

En este segundo escenario, las gráficas de todos los son muy similares. La única diferencia que se logra encontrar es un cambio en la saturación al llegar a potencias de salida elevadas, por lo que hemos recogido los datos de fotocorriente de todos los dispositivos para el máximo valor de potencia, y hemos realizado una comparación entre ellos. Nos hemos dado cuenta de que esta fotocorriente máxima, en el punto álgido de potencia, se elevaba conforme aumentábamos el grosor del sustrato, como vemos en la figura 35. En ella, se han representado los valores de todos los fotodetectores cuando el láser aportaba la máxima potencia de salida, diferenciando con colores los distintos grosores de sustrato. Se puede ver cómo, salvo alguna excepción, todos los dispositivos siguen esta tendencia.

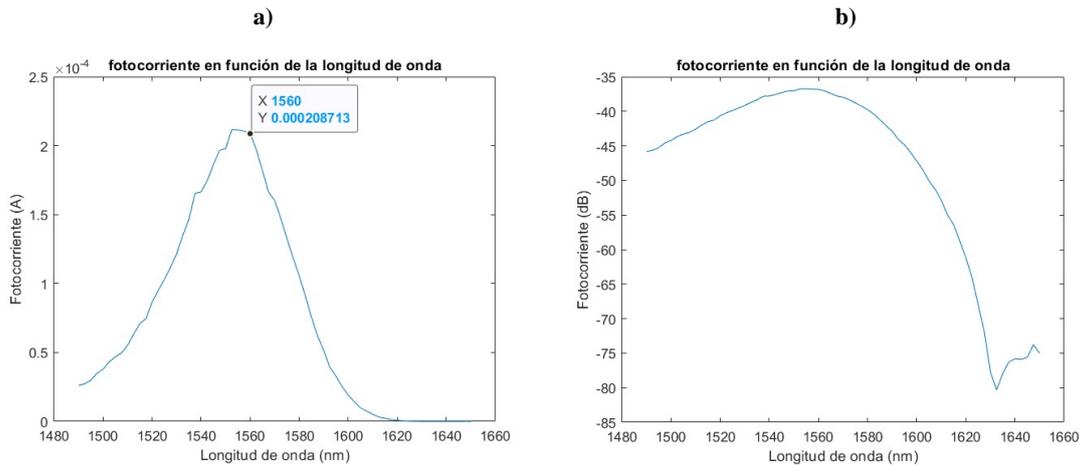


**Figura 35. Comparación de fotocorriente máxima en distintos sustratos.**

En el resto de los parámetros de diseño existentes, no hemos encontrado mucha diferencia al variar entre los distintos valores.

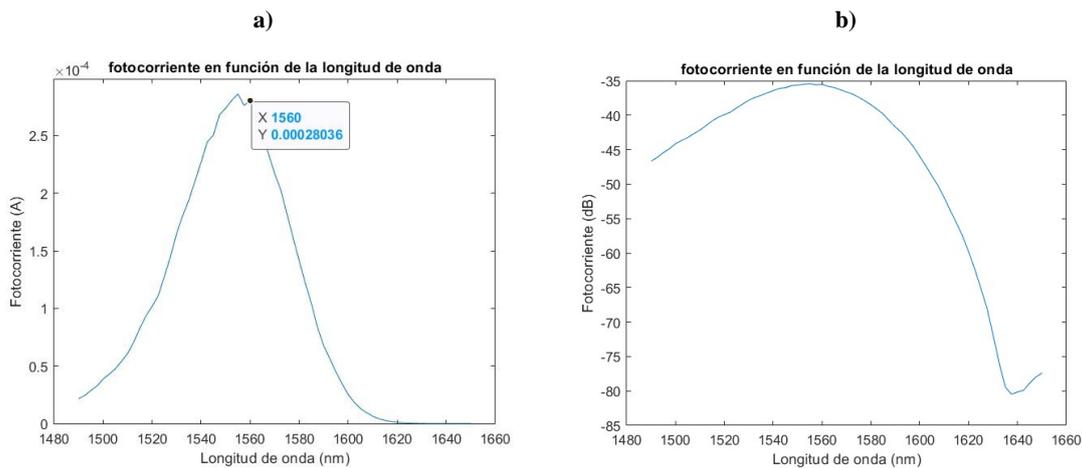
### 6.1.3 Fotocorriente en función de la longitud de onda

Este será el tercer y último escenario, en el que evaluaremos los fotodetectores en condiciones de estática, fijaremos un valor de tensión y potencia de salida del láser fijos, y realizaremos un barrido en longitud de onda desde 1480nm hasta 1660 nm. Las gráficas obtenidas para el dispositivo default (Figura 36) corroboran la capacidad óptima del germanio como material absorbente, a una longitud de onda en torno a los 1550 nm. Conforme nos alejamos de este valor, vemos que la fotocorriente decae rápidamente, obteniendo valores muy reducidos por encima de 1600 nm.



**Figura 36. Fotocorriente en función de longitud de onda en dispositivo default a) Unidades lineales b) Unidades logarítmicas.**

De la misma manera que en los anteriores subapartados, mostraremos la respuesta del fotodetector “H220\_L20\_G3\_I0\_W1000”, dispositivo que presentaba un gran rendimiento. En la figura 37, podemos ver que las gráficas (tanto de unidades lineales como de logarítmicas) son prácticamente iguales, excepto por el valor de fotocorriente, que como ya dijimos anteriormente, es superior en nuestros dispositivos.



**Figura 37. Fotocorriente en función de longitud de onda en dispositivo “H220\_L20\_G3\_I0\_W1000” a) Unidades lineales b) Unidades logarítmicas.**

Hemos intentado comparar todas las gráficas de los dispositivos con el objetivo de apreciar algún cambio en la respuesta, pero no se ha llegado a ninguna conclusión, ya que son todas prácticamente iguales. Por tanto, en este escenario, no hemos llegado a identificar qué parámetros de diseño serían mejores.

## 6.2 Medidas en RF

La segunda configuración que estableceremos en nuestro puesto de trabajo la realizaremos sobre un número reducido de fotodetectores. Escogeremos para estas medidas los fotodetectores que presentaban mejor rendimiento en estática, en términos de fotocorriente generada, ya comentados en el apartado anterior. Esta reducción en el número de dispositivos se debe a que los equipos y materiales que estábamos utilizando debían ser devueltos al laboratorio para su uso en otros proyectos. Esto, sumado a la fecha límite para la realización de este trabajo, hizo que decidiéramos reducir el número de dispositivos a medir en esta configuración.

Para la realización de estas medidas, fue necesario cambiar algunos elementos del montaje del setup, así como añadir nuevos elementos para generar esta condición deseada de radiofrecuencia, necesaria para medir el ancho de banda de los fotodetectores.

Para la medición en RF, no era necesario disponer de un láser que variase su longitud de onda, ya que la íbamos a tener una longitud de onda fija. En la figura 38, y según vemos en la pantalla que presenta el láser, tenemos una longitud de onda fija muy cercana a 1550 nm y una potencia de 3dBm para poder obtener medidas precisas y fiables del ancho de banda de cada fotodetector bajo condiciones de radiofrecuencia.



**Figura 38. Láser no sintonizable utilizado en configuración de radiofrecuencia.**

También fue necesario eliminar las puntas de contacto que utilizábamos en la anterior configuración, ya que ahora necesitaríamos unas especiales para las condiciones de radiofrecuencia. Estas cuentan con una sola punta, que se divide en dos muy pequeñas en su extremo, y que presentan una separación exacta a la que tienen los electrodos de nuestros fotodetectores. De esta manera, el proceso de contacto de las puntas es más rápido, ya que ambas puntas se conectarán a la vez. En la figura 39, podemos ver una imagen donde se aprecia a la perfección nuestra zona de trabajo. Se pueden ver en detalle tanto la fibra óptica como la única punta de RF insertándose en el chip.

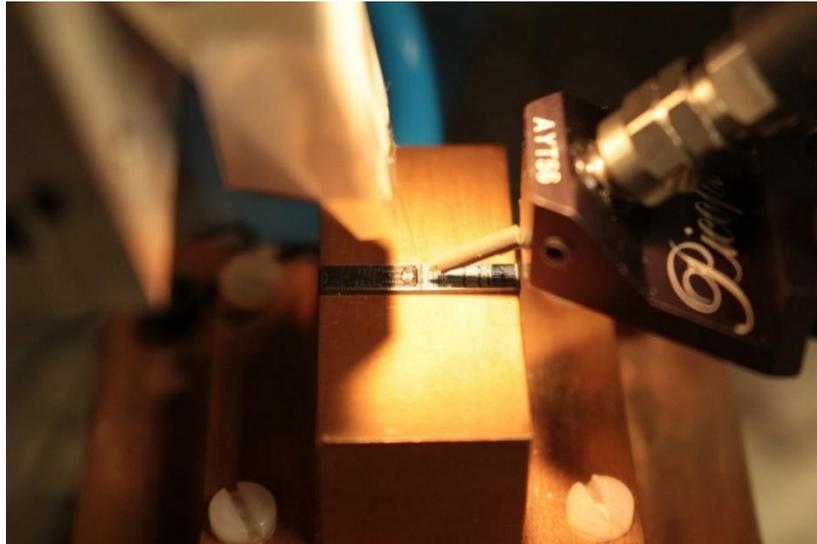


Figura 39. Área de trabajo que incluye el chip en su soporte, la fibra y las puntas de RF.

Como hemos comentado anteriormente, y más allá de los cambios a las condiciones de radiofrecuencia, ha sido necesario añadir elementos y equipos nuevos al setup.

El primer elemento que incluiremos en el setup será el generador de señales MP1800A (Figura 40). Será el encargado de suministrar la señal de referencia de radiofrecuencia deseada en nuestro setup, con una frecuencia central de 12500 MHz.

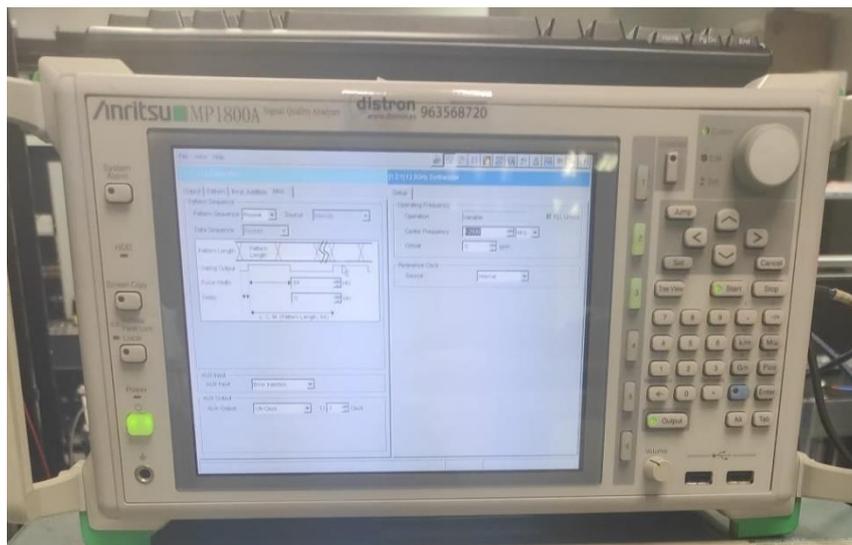


Figura 40. Generador de señales MP1800A.

El generador de señales irá conectado a un modulador MX-LN-10, que opera en un rango de longitud de onda de 1530 nm a 1625 nm, y cuyo diseño podemos ver en la figura 41. El modulador tendrá una entrada óptica para la fibra, sobre la que actuará una señal de radiofrecuencia proveniente del generador de señales, como ya hemos comentado. Finalmente, esta señal saldrá del modulador hacia la punta de RF. También presenta dos conexiones en sus pines 1 y 2, que son los encargados de suministrar tensión a este modulador.



Figura 41. Modulador MX-LN-10.

Para representar la señal, necesitaremos un analizador digital, concretamente el Tektronix DSAB200, mostrado en la figura 42. Es un osciloscopio de muestreo de altas prestaciones que permite capturar y analizar señales en condiciones de altas frecuencias. Este elemento estará conectado al generador de señales para sincronizar el flanco de disparo, y también presentará una entrada proveniente de la punta de RF, que será la encargada de suministrar la respuesta del fotodetector, para así poder representar su ancho de banda.

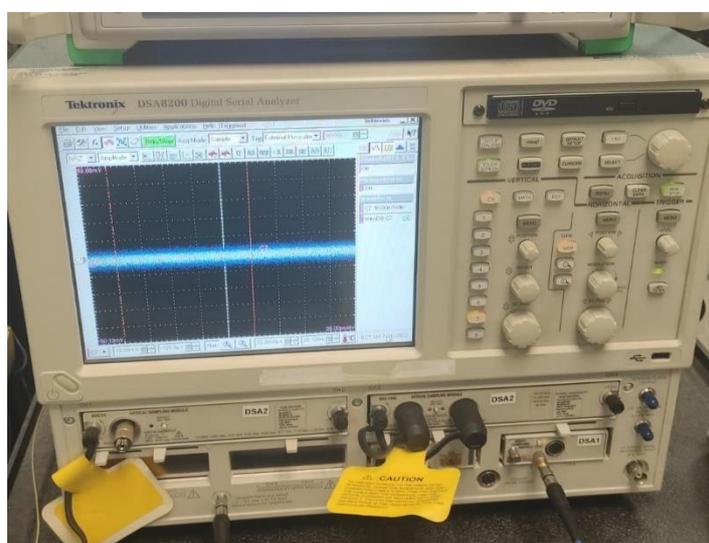


Figura 42. Analizador digital Tektronix DSAB200.

En último lugar, para conectar los tres elementos entre sí (puntas de contacto, modulador y analizador digital) y hacer que nuestro montaje funcione, necesitaremos un Bias Tee, que es un componente pasivo con tres puertos, que nos permitirá combinar la señal de RF con la señal de corriente continua, así como extraer la señal modulada finalmente hacia el analizador digital para su representación y análisis. Dicha conexión la podemos ver en la imagen de la figura 43.

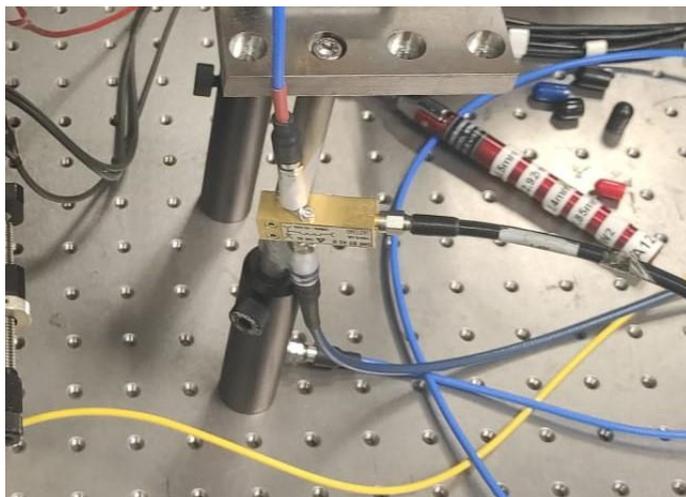


Figura 43. Conexión de elementos de setup de radiofrecuencia mediante Bias Tee.

Una vez comentados los elementos que hemos cambiado y añadido, hablaremos sobre el proceso de medición. Hemos creado un nuevo código de Matlab para automatizar las medidas y generar directamente la gráfica deseada de ancho de banda de cada fotodetector. Este código se encuentra insertado en su totalidad en el anexo 9.2. Posteriormente, se ha realizado la medida de igual forma que en estática, con la salvedad del cambio de puntas de contacto, que permite realizar la inserción solo una vez por fotodetector, en lugar de las dos anteriores.

En la configuración de radiofrecuencia, no teníamos posibilidad de representar el ancho de banda del fotodetector default de Huawei, aunque sí que conocíamos su respuesta (30 GHz). Pese a que nuestra idea inicial nos decía que se iban a mejorar las condiciones en radiofrecuencia (al igual que en estática), cuando empezamos a realizar las medidas de nuestros fotodetectores, nos desilusionamos bastante, ya que no se cumplían los objetivos.

El fotodetector que consiguió mejores prestaciones es el “H220\_L20\_G3\_I750\_W1500”, con un ancho de banda a -3 dB de 13,0074 GHz, valor muy lejano al que esperábamos obtener en este proyecto (la idea era igualar o incluso mejorar el valor de 30 GHz). Podemos ver la gráfica de resultados en la figura 44, donde se ha representado el ancho de banda en función de la magnitud en dB. Se han representado varias curvas dependiendo del voltaje de polarización aplicado, con valores entre -5V y 0 V, aunque se ha elegido el valor de -3V como referencia a la hora de comparar los fotodetectores. Se puede apreciar en la gráfica como conforme aumenta el voltaje de polarización, la frecuencia se va reduciendo poco a poco hasta llegar a 0V donde se vuelve mínima.

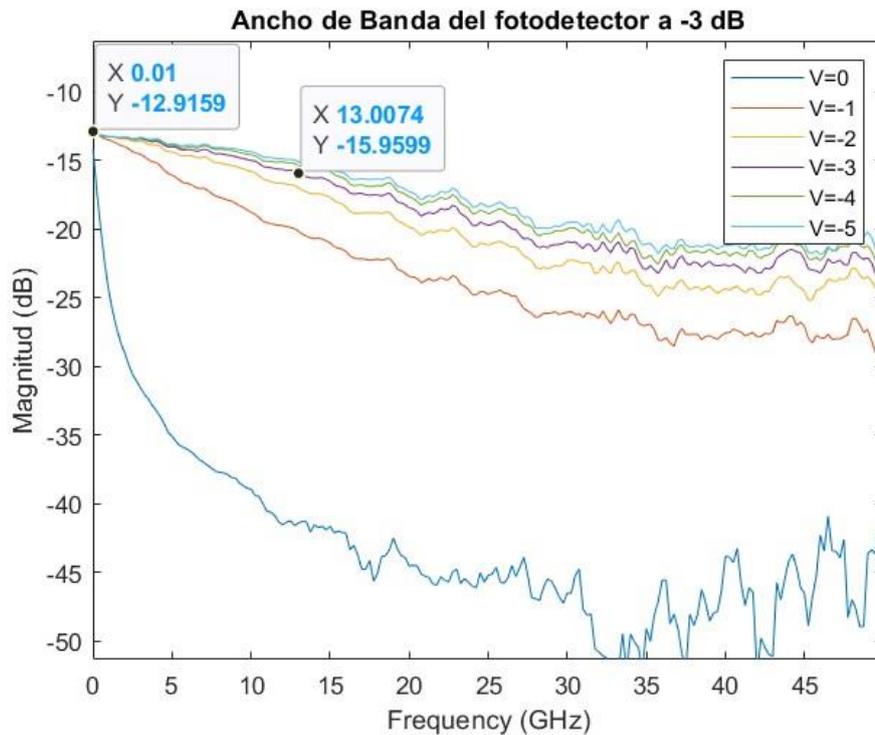


Figura 44. Representación de ancho de banda a -3 dB del fotodetector “H220\_L20\_G3\_I750\_W1500”.

El fotodetector con peor rendimiento de los medidos en RF fue el “H70\_L40\_G5\_I1500\_W1500”. Vemos su respuesta en la figura 45, donde, a diferencia de la gráfica anterior, se puede apreciar que los valores de las curvas de cada voltaje de polarización son más parecidos a los de la curva de voltaje cero, presentando una pendiente descendente mucho más abrupta y obteniendo un valor de ancho de banda en el fotodetector de 1.25975 GHz.

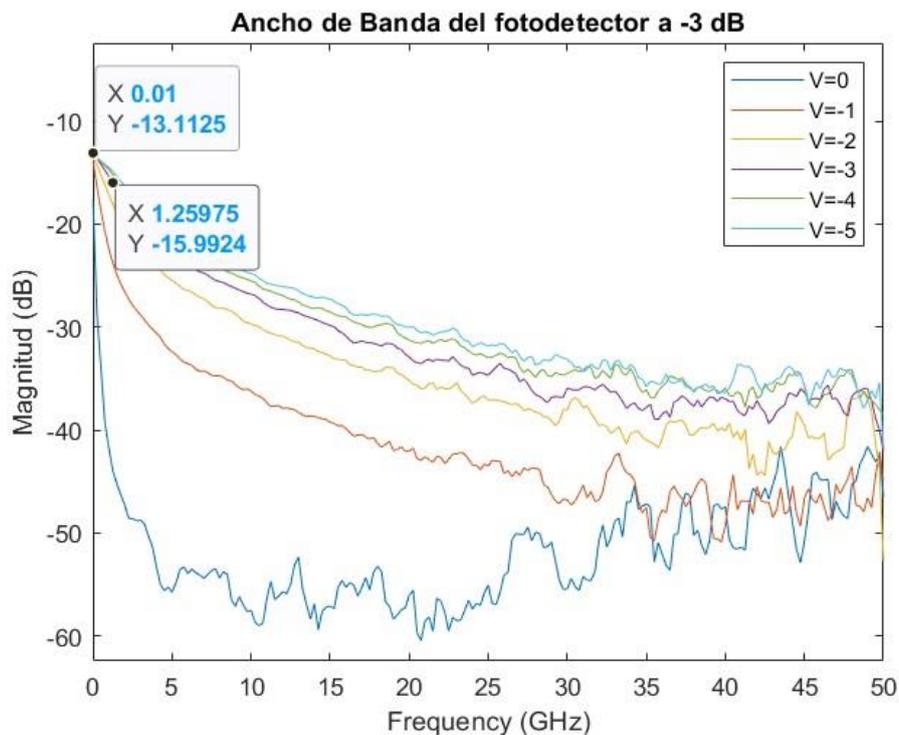


Figura 45. Representación de ancho de banda a -3 dB del fotodetector “70\_L40\_G5\_I1500\_W1500”.

A continuación, analizaremos todos los resultados de ancho de banda para los fotodetectores medidos para conseguir identificar cómo influyen los diferentes parámetros de diseño en la respuesta obtenida.

En la tabla 2, hemos plasmado las medidas de los fotodetectores con grosor de sustrato de tipo strip, que son los fotodetectores que mejores prestaciones consiguieron. Las primeras cinco columnas hacen referencia a los valores de los parámetros de diseño, la sexta al valor de ancho de banda obtenido y la séptima al ranking en el que se encuentra el fotodetector en cuestión, en términos de mejor ancho de banda. Los casos en los que el ranking no tiene valor se deben a que el fotodetector no ha superado la barrera de 9 GHz de ancho de banda. Hemos utilizado los mismos colores característicos para distinguir los fotodetectores en la tabla que en la vista global del chip que vimos anteriormente, para que sean fácil de ubicar.

Los fotodetectores han sido ordenados en base a los siguientes criterios, cada uno de ellos más restrictivo que el anterior. En primer lugar, los hemos agrupado por su grosor de sustrato, después en orden ascendente de longitud de germanio y, por último, hemos colocado en primer lugar los dispositivos que presentaban una región intrínseca menor. Los dos dispositivos sombreados en rojo, como ya comentamos anteriormente, eran diferentes a los demás y se encuentran en la parte superior derecha del chip.

| ANCHO DE BANDA GENERADO EN RF |    |   |      |      |              |         |
|-------------------------------|----|---|------|------|--------------|---------|
| SILICIO                       | L  | G | I    | W    | BW-3dB (GHz) | ranking |
| 220                           | 10 | 3 | 0    | 1000 | 12,5075      | 3       |
| 220                           | 10 | 3 | 500  | 500  | 12,5075      | 3       |
| 220                           | 20 | 3 | 0    | 1000 | 11,7576      | 5       |
| 220                           | 20 | 3 | 500  | 500  | 12,0076      | 3       |
| 220                           | 20 | 3 | 500  | 1000 | 12,7575      | 2       |
| 220                           | 20 | 3 | 750  | 1500 | 13,0074      | 1       |
| 220                           | 30 | 3 | 0    | 1000 | 12,7575      | 2       |
| 220                           | 30 | 3 | 500  | 500  | 12,0076      | 4       |
| 220                           | 40 | 3 | 0    | 1000 | 11,2578      | 5       |
| 220                           | 40 | 3 | 500  | 500  | 12,7575      | 2       |
| 220                           | 40 | 3 | 750  | 750  | 11,2578      | 6       |
| 220                           | 40 | 3 | 1500 | 1500 | 3,5093       | -       |
| 220                           | 40 | 5 | 0    | 1000 | 5,5089       | -       |
| 220                           | 40 | 5 | 500  | 500  | 6,25875      | -       |
| 220                           | 40 | 5 | 750  | 750  | 8,5083       | -       |
| 220                           | 40 | 5 | 1500 | 1500 | 2,5095       | -       |

**Tabla 2. Datos de ancho de banda en los fotodetectores según sus parámetros de diseño.**

Analizando los datos, nos dimos cuenta de que el que mejor ancho de banda conseguía era el “H220\_L20\_G3\_I750\_W1500”, pero también de que había otros fotodetectores en un rango muy cercano a este, por lo que nuestro nuevo objetivo pasaba por identificar qué parámetros son los que conseguían mejorar el rendimiento de los dispositivos.

Para ello, podemos visualizar en la tabla 3 los resultados correspondientes al resto de las medidas de los fotodetectores medidos en RF, en sustratos slab y grating. Utilizando ambas tablas, compararemos y buscaremos el patrón ideal de valor de los parámetros de diseño para conseguir fotodetectores con resultados óptimos.

| ANCHO DE BANDA GENERADO EN RF |    |   |      |      |              |         |
|-------------------------------|----|---|------|------|--------------|---------|
| SILICIO                       | L  | G | I    | W    | BW-3dB (GHz) | ranking |
| 150                           | 10 | 3 | 500  | 500  | 10,7579      | 8       |
| 150                           | 20 | 3 | 500  | 500  | 10,258       | 9       |
| 150                           | 20 | 3 | 500  | 1000 | 10,7579      | 8       |
| 150                           | 20 | 3 | 750  | 1500 | 9,0082       | 13      |
| 150                           | 30 | 3 | 500  | 500  | 9,75805      | 10      |
| 150                           | 40 | 3 | 0    | 1000 | 10,7579      | 8       |
| 150                           | 40 | 3 | 500  | 500  | 11,0078      | 7       |
| 150                           | 40 | 3 | 750  | 750  | 8,25835      | -       |
| 150                           | 40 | 3 | 1500 | 1500 | 2,0096       | -       |
| 150                           | 40 | 5 | 0    | 1000 | 7,5085       | -       |
| 150                           | 40 | 5 | 500  | 500  | 7,5085       | -       |
| 150                           | 40 | 5 | 750  | 750  | 4,75905      | -       |
| 150                           | 40 | 5 | 1500 | 1500 | 2,0096       | -       |
| 70                            | 20 | 3 | 500  | 1000 | 9,25815      | 12      |
| 70                            | 20 | 3 | 750  | 1500 | 8,25835      | -       |
| 70                            | 40 | 3 | 0    | 1000 | 9,75805      | 11      |
| 70                            | 40 | 3 | 500  | 500  | 9,75805      | 11      |
| 70                            | 40 | 3 | 750  | 750  | 6,0088       | -       |
| 70                            | 40 | 3 | 1500 | 1500 | 1,75965      | -       |
| 70                            | 40 | 5 | 0    | 1000 | 5,5089       | -       |
| 70                            | 40 | 5 | 500  | 500  | 4,5091       | -       |
| 70                            | 40 | 5 | 750  | 750  | 2,75945      | -       |
| 70                            | 40 | 5 | 1500 | 1500 | 1,25975      | -       |

Tabla 3. Datos de ancho de banda en los fotodetectores según sus parámetros de diseño en sustrato grating y slab.

Comenzaremos con el grosor del sustrato. Gracias a la columna de ranking se puede identificar fácilmente cómo influye este parámetro en la respuesta. Todos los dispositivos de sustrato strip se encuentran en las primeras posiciones, les siguen los de tipo grating y por último los de tipo slab, exceptuando el fotodetector “H150\_20\_3\_750\_1500”, que es el único que se sale de este criterio, obteniendo una respuesta inusual. Por tanto, podemos asegurar con gran certeza que, a mayores grosores de sustrato, mejor rendimiento de nuestros dispositivos.

El siguiente parámetro para analizar será la longitud de germanio, que no influye mucho en los resultados de nuestros fotodetectores. Prueba de esto es que tenemos dispositivos con longitudes de 10, 20, 30 y 40  $\mu\text{m}$  y, en cada una de las longitudes, podemos encontrar dispositivos con buenos y malos rendimientos, por lo que la longitud no es un parámetro interesante para estudiar.

En cuanto al ancho del germanio, observamos con claridad en las tablas que los dispositivos con dimensiones de ancho de 5  $\mu\text{m}$  tienen unas prestaciones pésimas, no llegando ninguno de ellos al corte de los 9 GHz. En este caso, llegamos a la conclusión de que, para mejorar el ancho de banda de nuestros fotodetectores, era clave disminuir el ancho de banda del germanio.

Los últimos parámetros por analizar serán los anchos de la región intrínseca y de la guía de ondas, donde tendremos dos escenarios diferentes a la hora de tratar los resultados.

El primero de ellos es cuando la guía y la región intrínseca presentan valores idénticos. En este caso, vemos que, al utilizar dimensiones menores, obtenemos mejores resultados en la mayoría de los dispositivos, siendo las dimensiones de I\_500 y W\_500 las que obtienen un mayor ancho de banda.

El segundo se da cuando la región intrínseca y la guía de ondas tienen distintas medidas. Así, la mayoría de los dispositivos presentan buena respuesta cuando los demás parámetros comentados son los idóneos.

A modo de resumen, hemos realizado la siguiente tabla (Tabla 4), tanto en estática como en RF.

| <b>Tendencias que aumentan la respuesta del fotodetector</b> |  |  |
|--|--|--|
| <b>Parámetros</b>  | <b>Estática</b>  | <b>RF</b>  |
| <b>Grosor del sustrato</b>                                   | No se han encontrado tendencias, aunque los sustratos de 220 nm obtenían un mejor comportamiento general.                                    | Substratos más gruesos obtienen mejores prestaciones.  |
| <b>Longitud del germanio</b>                                 | No se han encontrado tendencias, aunque los dispositivos con 20 $\mu\text{m}$ obtenían un mejor comportamiento general.                      | No se han encontrado tendencias con este parámetro.  |
| <b>Ancho del germanio</b>                                    | No se han encontrado tendencias, aunque los dispositivos con 3 $\mu\text{m}$ de ancho del germanio obtenían un mejor comportamiento general. | Dispositivos con anchos de germanio menores generan mejores prestaciones.  |
| <b>Ancho de región intrínseca y guía de ondas</b>            | No se han encontrado tendencias, aunque los anchos distintos o iguales y reducidos obtenían un mejor comportamiento general.                 | Cuando estos dos parámetros son distintos o iguales y presentan unas dimensiones reducidas se obtienen mejores prestaciones. |

Tabla 4. Información obtenida del análisis de las medidas de fotodetectores en RF.

### 6.3 Diagramas de ojo

En este apartado, representaremos los diagramas de ojo de los dispositivos medidos en RF. Estos son utilizados para comprender el comportamiento de los pulsos que se propagan en un enlace de comunicaciones ópticas. Se forman debido a una superposición de señales digitales, y nos proporcionarán datos sobre la calidad y rendimiento de nuestros fotodetectores en términos de desfases o niveles de ruido e interferencia.

En la figura 46, podemos observar las partes que presenta un diagrama de ojo. Será de gran ayuda conocer cada una de ellas para comprender mejor el comportamiento de nuestros dispositivos. En el mundo de las comunicaciones digitales, se trabaja con señales que representan valores binarios, que representan ausencia o presencia de información. Estos niveles serán la parte superior e inferior del ojo. El cruce de amplitud es el momento en el que la señal cambia de valor lógico, y es esencial para la detección y sincronización de los datos. Por otro lado, el cruce de tiempo representa el instante en el que la señal cruza determinado umbral y nos ayuda a calcular el desfase temporal de la señal. El periodo de bit es el tiempo en el que se transmite un solo bit en una señal, y es de gran importancia para conocer la velocidad de la transmisión. Por último, hablaremos sobre el jitter, que refleja las posibles variaciones en el retardo del tiempo de la señal y que causa distorsión y desestabiliza la sincronización de la señal.

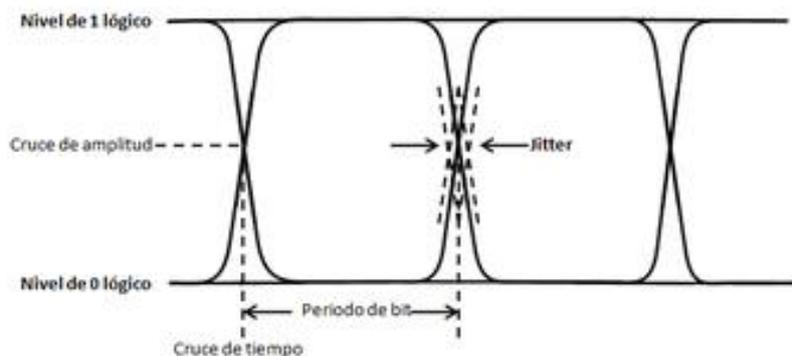
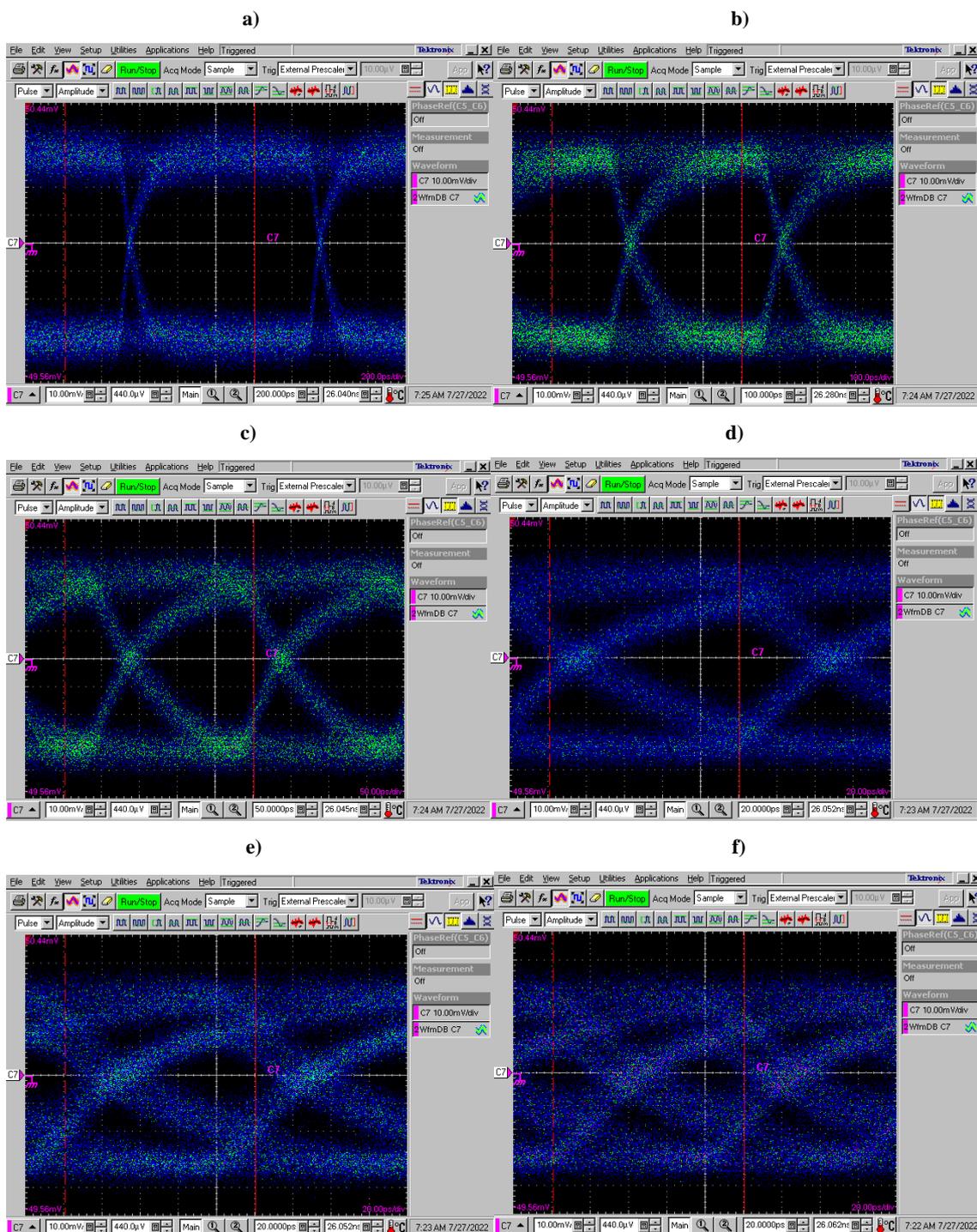


Figura 46. Partes de un diagrama de ojo.

El análisis del diagrama de ojos lo haremos desde dos escenarios distintos. En el primero de ellos, variaremos el bitrate proporcionado desde el generador de señales; y en el segundo, estableceremos un bitrate fijo y cambiaremos el voltaje de polarización suministrado. En ambos casos, mostraremos imágenes de los diagramas para un fotodetector con buen rendimiento y otro menos funcional para apreciar las diferencias.

Comenzaremos con el primer escenario. Vamos a empezar mostrando el fotodetector con mal funcionamiento, es decir, uno que hubiese obtenido valores muy reducidos de ancho de banda. Hemos escogido el "H150\_L40\_G5\_I1500\_W1500", en concreto. En la figura 47 mostramos los cambios en los diagramas de ojos para el fotodetector seleccionado en función del bitrate proporcionado por el generador de señales.



**Figura 47. Diagrama de ojos del fotodetector “H150\_L40\_G5\_I1500\_W1500” para distintos valores de bitrate a)1000 Mbps b) 2500 Mbps c) 5000 Mbps d) 7500 Mbps e) 10000 Mbps f) 12500 Mbps.**

Al visualizar los diagramas de ojo, podemos sacar en claro que, al aumentar el valor del bitrate inducido por el generador de señales, la apertura se va haciendo cada vez más pequeña y estrecha, debido a la aparición de interferencia entre símbolos, un ruido más elevado y la aparición de jitter en los cruces de los diagramas. Todos estos efectos nos aclaran que el aumento de la tasa de bits traerá como consecuencia la degradación de la señal, llegando en las últimas medidas de bitrate a ser complicado identificar la forma de ojo.

A continuación, analizaremos el caso contrario (Figura 48), donde podemos presenciar los distintos diagramas de ojo para nuestro fotodetector con mejores prestaciones. Es el caso del

“H220\_L20\_G3\_I750\_W1500”, y podremos ver las distintas respuestas con distintos valores de bitrate.

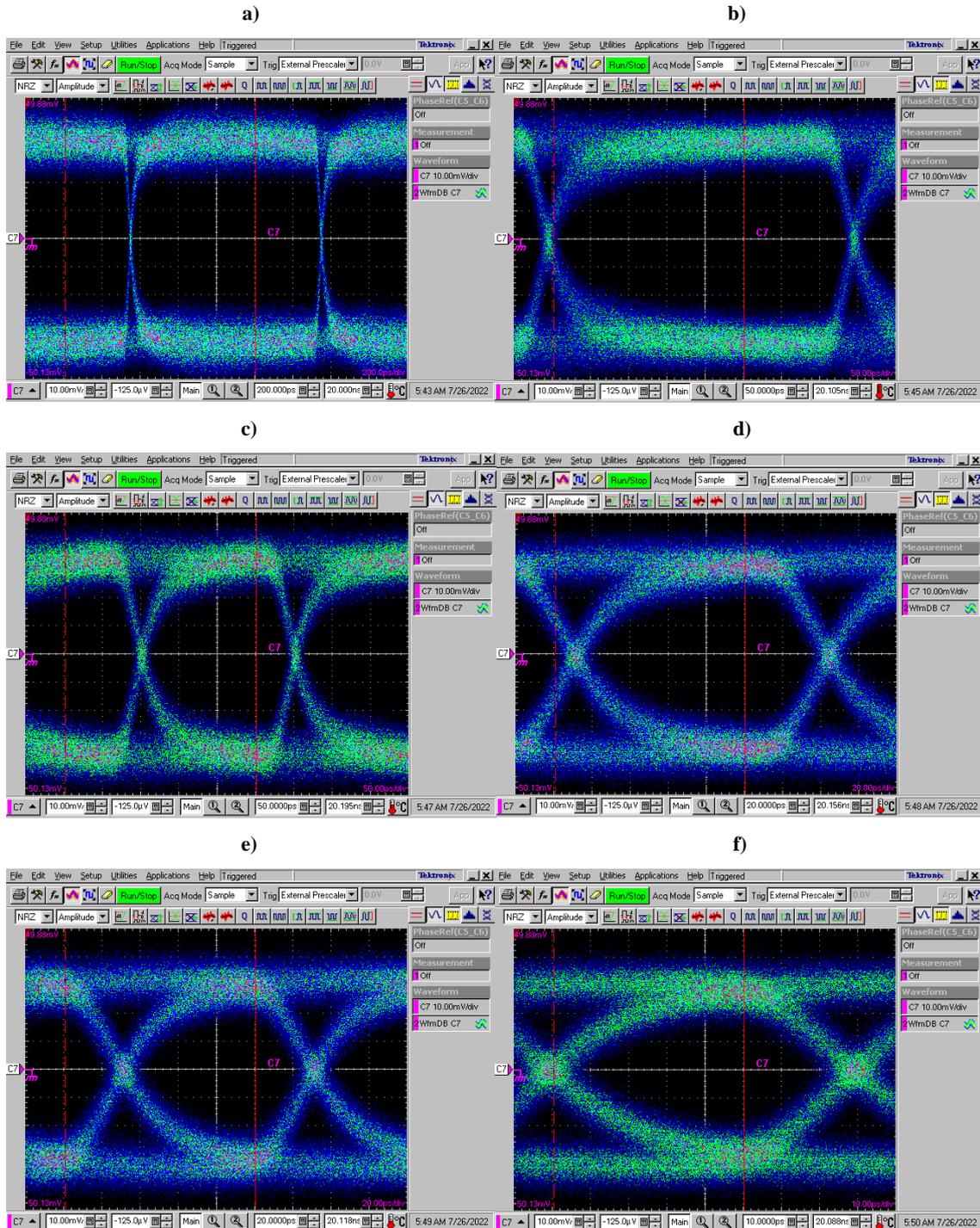
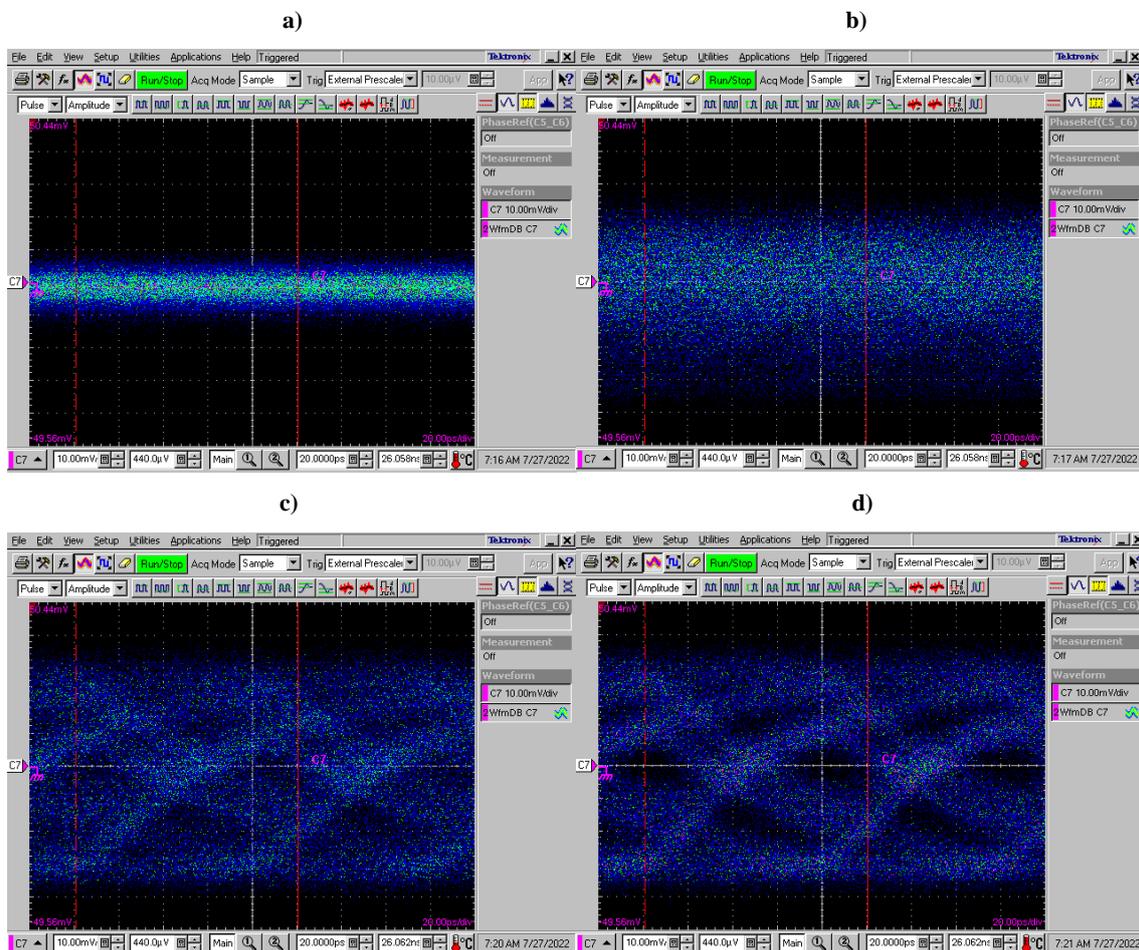


Figura 48. Diagrama de ojos del fotodetector “H220\_L20\_G3\_I750\_W1500” para distintos valores de bitrate a)1000 Mbps b) 2500 Mbps c) 5000 Mbps d) 7500 Mbps e) 10000 Mbps f) 12500 Mbps.

En este dispositivo, también vemos la degradación de la señal, aunque a diferencia del anterior, en todos los valores de bitrate podemos apreciar claramente el diagrama de ojos, garantizando que nuestro fotodetector presenta un buen rendimiento en enlaces de comunicaciones ópticas a alta velocidad.

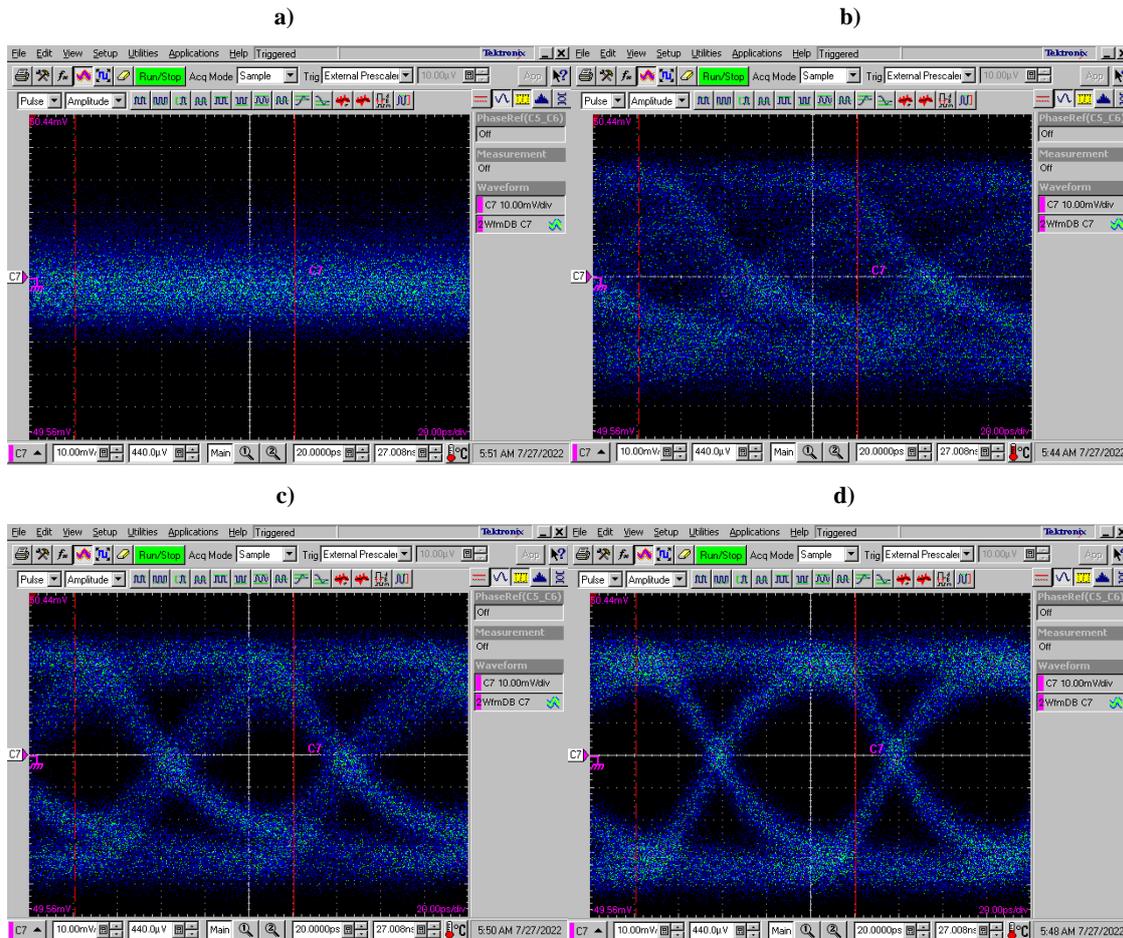
Procedemos a analizar el segundo escenario. Este lo conseguimos estableciendo un valor fijo de bitrate (concretamente el de 12500 Mbps) y variando el voltaje de polarización suministrado. De igual forma que con el bitrate, empezaremos mostrando el dispositivo con bajas prestaciones. En la figura 49, podemos visualizar cómo cambia bruscamente la forma de nuestro diagrama de ojos al variar este voltaje.



**Figura 49. Diagrama de ojos del fotodetector “H150\_L40\_G5\_I1500\_W1500” para bitrate fijo y distintos valores de voltaje de polarización a) 0 V b) 1 V c) 3 V d) 5 V.**

Como ya vimos con anterioridad al representar las gráficas de ancho de banda en función del voltaje de polarización, cuando este presentaba un valor mínimo, la respuesta de nuestro dispositivo era muy pequeña, y conforme aumentábamos el voltaje de polarización conseguíamos mejorar las condiciones de ancho de banda. Esto se ve representado también en los diagramas de ojos, donde a 0 V simplemente encontramos ruido, mientras que, conforme vamos subiendo el voltaje de polarización, nuestro diagrama se va haciendo cada vez más compacto, eliminando progresivamente los términos de ruido y jitter y llegando a obtener un diagrama mejor a los 5V. Aun así, este no llega a ser de buena calidad debido al dispositivo utilizado.

Para finalizar, mostraremos el caso del fotodetector de buenas prestaciones. La variación en sus diagramas la encontramos en la figura 50.



**Figura 50.** Diagrama de ojos del fotodetector “H220\_L20\_G3\_I750\_W1500” para bitrate fijo y distintos valores de voltaje de polarización a) 0 V b) 1 V c) 3 V d) 5 V.

En esta ocasión, empezamos teniendo también un diagrama con mucho ruido a 0 V, como es normal, pero al aumentar el voltaje de polarización, la respuesta evoluciona mucho mejor que en el anterior dispositivo. Se consigue en la imagen de 1V un diagrama parecido a los de altos voltajes en el otro dispositivo. Además, a 5 V se logra un diagrama bastante bueno, que garantiza la capacidad del dispositivo de poder establecer una comunicación óptica, eficiente y de gran calidad.

Tras todo lo enunciado en este apartado, hemos dejado bastante claro que para obtener una respuesta óptima en nuestro dispositivo deberemos buscar menores tasas de bits y voltajes de polarización elevados para conseguir dispositivos que establezcan comunicaciones óptimas a altas velocidades.

## 7. Conclusiones

A continuación, vamos a comentar las distintas conclusiones que hemos obtenido con la realización de este trabajo, en correlación con los objetivos enunciados al principio del proyecto.

1. Hemos llevado a cabo una exhaustiva investigación y comparación de los diversos tipos y configuraciones de fotodetectores disponibles para su selección en el proyecto. Analizamos con profundidad las posibles ventajas y desventajas de cada alternativa, consiguiendo finalmente encontrar las mejores tendencias de diseño.
  2. Durante la realización del trabajo, hemos trabajado de forma constante en un laboratorio especializado en fotónica integrada. Esta experiencia nos brindó la oportunidad de familiarizarnos con una amplia gama de instrumentos y técnicas que no eran parte de nuestro conocimiento previo. Gracias a ello, fuimos capaces de crear dos montajes experimentales distintos, combinando los distintos componentes e incluso generando múltiples escenarios de simulación gracias al software.
  3. La influencia de los distintos parámetros de diseño en la respuesta de los detectores fue minuciosamente investigada. Identificamos que los grosores mayores en el sustrato y en la capa de germanio contribuían a una mejora de la respuesta. En cuanto a longitud, no observamos ninguna tendencia, pero sí vimos un mejor comportamiento general en dispositivos de 20  $\mu\text{m}$ , sobre todo en los dispositivos especiales. Por último, en cuanto al ancho de guía y de región intrínseca, demostramos que dimensiones más reducidas de estas, incluso siendo diferentes ambos parámetros, tienden a dar un mejor resultado.
  4. Como resultado final, conseguimos lograr una notable mejora en la respuesta de los fotodetectores, tanto en condiciones estáticas como al analizar su respuesta mediante el diagrama de ojos. Sin embargo, es importante destacar que, a pesar de estos avances, observamos un rendimiento muy limitado en cuanto a términos de ancho de banda. Este último aspecto generó un sentimiento de decepción, terminando por reconocer que aún existen desafíos por superar para lograr un rendimiento óptimo en esta área.
  5. En conjunto, este trabajo de investigación ha permitido un profundo entendimiento de los fotodetectores y de su aplicación en la fotónica integrada. Mediante una rigurosa exploración de opciones, análisis detallado y experimentación práctica en el laboratorio, hemos avanzado en nuestra comprensión y competencia en esta disciplina, llegando a aportarnos una base sólida que utilizaremos para seguir investigando, si es posible, en futuros proyectos de detección óptica o de fotónica integrada en general.
- **Posible investigación futura:** En nuestro caso, por falta de tiempo no se ha podido realizar, pero en el caso de que se quisiese seguir investigando en la fabricación de fotodiodos de germanio sobre silicio, la línea a seguir sería volver a fabricar otro banco de fotodetectores en un circuito fotónico integrado, pero, en este caso, siguiendo las pautas que se ha podido demostrar que nos aportaban un mejor rendimiento a la hora de diseñar el chip.

## 8. Bibliografía

- [1] GLOBE NEWSWIRE "Photonic Integrated Circuit Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2022-2027", August 2022
- [2] Molly Piels and John E. Bowers. "Photodetectors for silicon photonic integrated circuits". Department of electrical and computer engineering, university of California Santa Barbara, USA. November 2015.
- [3] Y. Wang et al., "High-Power Photodiodes With 65 GHz Bandwidth Heterogeneously Integrated onto Silicon-on-Insulator Nano-Waveguides," in IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 24, no. 2, pp. 1-6, March-April 2018.
- [4] Léopold Virot. "Développement de photodiodes à avalanche en Ge sur Si pour la détection faible signal et grande vitesse". Optique / photonique. Université Paris Sud - Paris XI, 2014. Français. ffNNT: 2014PA112414ff. fftel-01136096
- [5] Aliane, A., Ouvrier-Buffet, J. L., Ludurczak, W., André, L., Kaya, H., Vialle, C., Benwadih, M., Goudon, V., Becker, S., & Hartmann, J. (2020). Fabrication and characterization of sensitive vertical P-i-N Germanium photodiodes as infrared detectors. *Semiconductor Science and Technology*, 35(3), 035013. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ab6bf7>
- [6] Keithley, (2011). Series 2400 SourceMeter® User's Manual. <https://www.tek.com/en/products/keithley/source-measure-units/2400-standard-series-sourcemeter> [online]
- [7] Yenista OPTICS. (2010). TUNICS-T100R USER MANUAL.
- [8] Wim Bogaerts. (2022). Introduction to silicon photonics circuit design. [http://photonics.intec.ugent.be/download/pub\\_4869.pdf](http://photonics.intec.ugent.be/download/pub_4869.pdf) [online]
- [9] Maximize Market Research. (2023). Photonic Integrated Circuits (PIC) Market – Global Industry Analysis and Forecast. <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-photonic-integrated-circuits-pic-market/33399/> [online]
- [10] M. Piels and J. E. Bowers, "40 GHz Si/Ge Uni-Traveling Carrier Waveguide Photodiode," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 20, pp. 3502-3508, oct.15, 2014, doi: 10.1109/JLT.2014.2310780.
- [11] E. Rouvalis, M. Chtioui, F. van Dijk, F. Lelarge, M. J. Fice, C. C. Renaud, G. Carpintero, and A. J. Seeds, "170 GHz uni-traveling carrier photodiodes for InP-based photonic integrated circuits," *Opt. Express* 20, 20090-20095 (2012)
- [12] Galán Conejos, Jose Vicente, "Modelado, análisis y diseño de una técnica de acoplo eficiente entre fibra óptica y circuitos integrados ópticos de silicio", UPV, 2007, <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12326/TESINA%20MASTER%20-%20JV%20GALAN.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [13] He, J., Dong, T., & Xu, Y. (2020). Review of Photonic Integrated Optical Phased Arrays for Space Optical Communication. *IEEE Access*, 8, 188284-188298. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3030627>
- [14] J. V. Galan, P. Sanchis, J. Blasco, and J. Marti, "Study of high efficiency grating couplers for silicon-based horizontal slot waveguides," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 20, no. 12, pp. 985-987, jun. 2008.
- [15] Michel, J., Liu, J., & Kimerling, L. C. (2010). High-performance Ge-on-Si photodetectors. *Nature Photonics*, 4(8), 527-534. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.157>.



- [16] Liow, T.-Y., Lim, A.E., Duan, N., Yu, M., Lo, G., 2013. Waveguide germanium photodetector with high bandwidth and high L-band responsivity. In: Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference, Anaheim, CA
- [17] Chen, L., Lipson, M., 2009. Ultra-low capacitance and high speed germanium photodetectors on silicon. *Opt. Express*. 17 (10), 7901-7906
- [18] Assefa, S., Xia, F., Vlasov, Y.A., 2010c. Reinventing germanium avalanche photodetector for nanophotonic on-chip optical interconnects. *Nature*. 464, 8084
- [19] Duan, N., Liow, T.-Y., Lim, A., Ding, L., Lo, G., 2013. High speed waveguide-integrated Ge/Si avalanche photodetector. In: Optical Fiber Communication Conference, Anaheim, CA, United States

## 9. Anexos

### 9.1 Código Matlab medidas estática

```
if(exist('tunics','var') || exist('keithley','var'))
    delete(tunics);
    delete(keithley);
end
close all; clear; clc;
wavelength = 1560.000;
power = 0; %dBm
filepath = 'C:\Users\ERC\Desktop\InigoDiego\tests\';
filename = 'tests.mat';
%-----Crear objetos VISA de OSA y KEITHLEY
tunics = visa("keysight","GPIB0::10::INSTR");
keithley = visa("keysight","GPIB0::28::INSTR");
tunics.InputBufferSize = 8192;
%-----Abrimos objetos para mandar mensajes GPIB
fopen(tunics);
fopen(keithley);
%-----Query inicial para comprobar que se han abierto bien
disp(query(tunics,"*IDN?"))
disp(query(keithley,"*IDN?"))
%-----Configurar Laser
set(tunics,'Timeout',1000); %Timeout de 1000s
fwrite(tunics, "DBM");
fwrite(tunics, ['P=' num2str(power)]);
fwrite(tunics, ['L=' num2str(wavelength)]);
%-----Configurar fuente de tensión
fwrite(keithley,":SOUR:FUNC VOLT")
fwrite(keithley,":SOUR:CURRE:MODE FIX") %Fixed mode
fwrite(keithley,":SOUR:VOLT:RANGE:AUTO 1") %Fixed mode
fwrite(keithley,":SENS:FUNC \"CURR\"")
fwrite(keithley,":SENS:CURRE:PROT:LEV 0.5")
fwrite(keithley,":SENS:CURRE:DC:RANG:AUTO 1") %rango de la resolucion de la
medida de corriente
pause(0.002);%Descansito
%-----Configurar barrido

%Voltage definition
V = -5:0.05:1;
k_i = zeros(1,length(V));
k_v = zeros(1,length(V));
k_i_dark = zeros(1,length(V));
k_v_dark = zeros(1,length(V));
fwrite(keithley,":OUTP:STAT ON");

%-----Barrido
tic
fwrite(tunics,'ENABLE')
for i=1:length(V)
    fwrite(keithley,strcat(":SOUR:VOLT:LEV ",num2str(V(i)))); %Set Keithley
Voltage
    pause(0.003)%Descansito
    lectura = split(query(keithley,":READ?"),",");
    k_i(i) = str2double(lectura{2});
    k_v(i) = str2double(lectura{1});

    disp(strcat("Sweep ", num2str(i), " end"));
end
toc
fwrite(tunics,'DISABLE')
for i=1:length(V)
```

```
    fwrite(keithley, strcat(":SOUR:VOLT:LEV ", num2str(V(i)))); %Set Keithley
Voltage
    pause(0.003) %Descansito
    lectura = split(query(keithley, ":READ?"), ",");
    k_i_dark(i) = str2double(lectura{2});
    k_v_dark(i) = str2double(lectura{1});

    disp(strcat("Sweep ", num2str(i), " end"));

end
toc

fwrite(keithley, strcat(":SOUR:VOLT:LEV ", "0")); %Dejamos el voltaje a 0
%-----Cerramos los objetos
fclose(tunics);
fclose(keithley);
disp("Medida terminada");
%-----Guardamos medidas
% save(strcat(filepath,filename), 'k_i_dark', 'k_v_dark', 'k_i',
'k_v', 'wavelength', 'power');

plot(k_v, 10*log10(abs(k_i)), k_v_dark, 10*log10(abs(k_i_dark)))
```

## 9.2 Código Matlab medidas RF

```
H = 220; %Silicon height in nm
L = 40; %PD length in um
G = 5; %Germanium width in um
I = 1500; %Width of intrinsic region in nm
W = 1500; %Width of the input waveguide in nm
V = 0:5 ; %Measured reversed voltages

FileHeader = ['RF_H' num2str(H) '_L' num2str(L) '_G' num2str(G) '_I'
num2str(I) '_W' num2str(W) '_V'];

A = importdata([FileHeader num2str(V(1)) '.csv']);
N = size(A.data);
Freq = zeros(length(V), N(1));
Mag = zeros(length(V), N(1));
M_smooth = zeros(length(V), N(1));

Freq(1,:) = A.data(:,1);
Mag(1,:) = A.data(:,2);
M_smooth(1,:) = smooth(Freq(1,:), Mag(1,:));
LegendPlot = cell(1, length(V));
LegendPlot{1} = ['V=' num2str(V(1))];

for ind = 2:length(V)
    A = importdata([FileHeader num2str(V(ind)) '.csv']);
    Freq(ind,:) = A.data(:,1);
    Mag(ind,:) = A.data(:,2);
    M_smooth(ind,:) = smooth(Freq(ind,:), Mag(ind,:));
    LegendPlot{ind} = ['V--' num2str(V(ind))];
end

plot(Freq'*1e-9, M_smooth')
xlabel('Frequency (GHz)')
ylabel('Magnitud (dB)');
legend(LegendPlot)
```