

# **Ondas Terahercios y aplicaciones**

**Tesis de grado presentada**

**a la facultad de**

**Escola Tècnica d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona**

**Universitat Politècnica de Catalunya**

**Autor: Eduard Figueras Mateo**

*TECNOLOGIES I SERVEIS DE TELECOMUNICACIÓ*

**Tutora: María Concepción Santos Blanco**

**Barcelona, Junio 2018**

Agradecer a mi tutora María Concepción Santos Blanco por el apoyo y su tiempo durante la tesis.

Doy gracias al departamento Teoria Senyals i Comunicacions de la Universidad Politècnica de Catalunya de Barcelona por tener la oportunidad de utilizar el equipamiento y sus instalaciones.



## Tabla de contenido

Resumen .....	4
Historial de revisiones y registro de aprobaciones .....	5
1. Objetivos e introducción.....	6
2. Estado de la técnica .....	7
2.1. Los Terahercios, GAP y aplicaciones .....	7
2.2. Fotoconductividad.....	11
3. Descripción de los equipos TD y FD .....	11
4. Medidas y resultados .....	17
4.1. Laboratorio – Frequency Domain.....	17
4.2. Laboratorio – Time Domain .....	30
5. Conclusiones .....	34
6. Bibliografía.....	36
7. Anexos .....	37

## Resumen

El propósito de este proyecto es realizar una introducción a las ondas de Terahercios para seguir con la puesta en marcha de dos equipos de Terahercios; dominio de frecuencia, de la marca Toptica y del tiempo, de Menlo Systems. Existe una necesidad para poner a punto estos equipos, actualmente se está abriendo una brecha muy grande en este campo y creemos que tener dos equipos de esta tecnología funcionando estaría muy bien para dar un primer paso a futuros estudiantes. Una de las aplicaciones más importantes de los sistemas de Terahercios es estudiar el impacto de la caracterización del material y la identificación, pero también tiene beneficios en los campos de comunicaciones, imágenes, diagnóstico médico, monitoreo de la salud, control ambiental y detección química y biológica, así como seguridad y calidad - control de aplicaciones.

Se empieza por estudiar el funcionamiento de estos equipos que estaban en desuso desde hacía mucho tiempo. Se hace difícil encontrar ayuda para manipularlos, debido a que poca gente tiene experiencia con ellos, sobre todo con el sistema de onda continua (Frequency-Domain). Aunque estén descatalogados podremos obtener alguna indicación del fabricante. Actualmente los sistemas de Terahercios se hallan en una etapa de evolución hacia unidades de usuario robustas y fáciles de utilizar. Los equipos de los cuales dispone el departamento, en cambio al ser de los primeros prototipos que aparecieron en el mercado hace algunos años, son sistemas complejos y delicados, que requieren usuarios expertos, pero a la vez permiten acceso y control por parte del usuario de los principales elementos. Tenemos a mano las principales piezas y lo más importante para el aprendizaje se ven claramente todas las partes del equipo, no como los actuales que son del tipo “cajas negras”.

Hablaremos de dos sistemas importantes de Terahercios; el del dominio del tiempo y el del dominio de la frecuencia. Aprenderemos a usarlos y cuál es mejor en una situación determinada. En el sistema del dominio de la frecuencia nos encontramos con problemas de alineamiento de los laser, potencia no equilibrada en la salida del acoplador óptico y quemaduras e imperfecciones en las fibras. Como consecuencias de estos factores el sistema respondía con valores muy bajos de fotocorriente y era muy inestable. Se llevaron a cabo métodos para solucionar los problemas y se han conseguido mejoras sustanciales.

En el sistema temporal se encontró con problemas de alineamiento de los espejos y lentes. Una vez corregido se hicieron medidas con resultados aceptables, pero poco estables. Se decidió desmontar todo el sistema para comprobar las antenas directamente ya que se quiso mejorar los resultados obtenidos anteriormente. Encontramos una desconexión entre el Bias y el chip que se pudo solucionar y obtener medidas de fotocorriente dentro de los niveles nominales. Dado que al contrario del sistema de frecuencia, el alineamiento del láser debe ser en espacio libre, lo que resulta en un proceso de alineamiento difícil, incómodo, largo y tedioso, y que obliga a situar las antenas en una posición determinada respecto del láser, el siguiente paso es plantear un acoplo en fibra de la señal óptica.

Se aprovecha para realizar una pequeña guía de manipulación de los equipos y una descripción de buenas prácticas, consejos.

## Historial de revisiones y registro de aprobaciones

Revisión	Data	Propósito
0	18/06/2018	Creación del documento
1	25/06/2018	Revisión del documento
2	28/06/2018	Revisión del documento
3	30/06/2018	Revisión del documento
4	02/06/2018	Revisión del documento

Name	e-mail
Eduard Figueras Mateo	eduardfigueras@gmail.com
María Concepción Santos Blanco	santos@tsc.upc.edu

Escrito por:		Revisado y aprobado por:	
Data	18/06/2018	Data	30/06/2018
Nombre	Eduard Figueras Mateo	Nombre	María Concepción Santos Blanco
Cargo	Autor del proyecto	Cargo	Supervisor del proyecto

## 1. Objetivos e introducción

La banda de Terahercios ocupa una gran parte del espectro electromagnético, se sitúa entre los infrarrojos y las microondas, en términos de frecuencia se sitúan entre 100 GHz hasta los 10 THz, o lo que es lo mismo hablando en longitud de onda, entre 3mm i 30  $\mu\text{m}$ .

Esta sección del espectro radioeléctrico tiene unas características y propiedades únicas, son capaces de ver que hay más allá traspasando materiales como plásticos, tejidos, papel y cartones. Existen muchos materiales con la peculiaridad que se pueden estudiar sus características a través de las líneas de absorción. Aprovechando esta capacidad podemos ser capaces de detectar la “huella” de muchas biomoléculas, proteínas, explosivos, narcóticos...

Una gran ventaja de trabajar en esta venta es debido al efecto no-ionizante, es considerado biológicamente inocuo a diferencia de los rayos X.

Entre sus aplicaciones se encuentran la caracterización e identificación de materiales. También tiene beneficios en los campos de comunicaciones, imagen, diagnóstico médico, monitoreo de la salud, control ambiental y detección química y biológica, así como seguridad y calidad-control de aplicaciones.

Hace varios años era muy difícil producir una radiación controlada de Terahercios y todavía hoy en día estamos lejos de alcanzar las eficiencias de emisión y detección que serían deseables. Por esa razón, estas ondas son consideradas como la última frontera del espectro radioeléctrico.

Hoy en día se puede trabajar entre 0.3 y 10 THz aplicando técnicas basadas en laser. Los láser femtosecond o diodos sintonizables son los responsables de la parte optoelectrónica de conseguir la generación del Terahercio.

Los fotomezcladores, fotoconductores convierten la luz cercana al infrarrojo del láser a Terahercios.

Hablaremos de dos sistemas, el del dominio de tiempo y del de dominio de frecuencia. Aprenderemos a usarlos y a elegir cuál de ellos es mejor dependiendo de la situación en que nos encontremos.

Añadiremos un apartado que va a servir de guía para las personas que se quieran introducir en el mundo de los Terahercios, concretamente con los equipos de nuestro laboratorio. Será muy útil tener documentado una descripción del funcionamiento de los equipos así como un manual de buenas prácticas para futuros lectores.

Actualmente los dos sistemas no acaban de funcionar por lo que intentaremos encontrar el problema y solucionarlo. No disponemos de ninguna ayuda, ya que estos dos equipos hace mucho tiempo que no se usan. Una vez los dos sistemas en marcha nos gustaría hacer medidas, realizar algún tipo de aplicación y comparaciones.

Los principales objetivos del proyecto son:

- 1.- Introducción a las ondas de Terahercios.
- 2.- Introducir los sistemas del dominio del tiempo y del dominio de la frecuencia.
- 3.- Solucionar los problemas que nos encontremos en los sistemas.
- 4.- Uso de los dos sistemas.
- 5.- Realizar documentación de ayuda para los próximos estudiantes.

## 2. Estado de la técnica

### 2.1. Los Terahercios, GAP y aplicaciones

¿Por qué se le denomina THz Gap a la banda de los Terahercios?

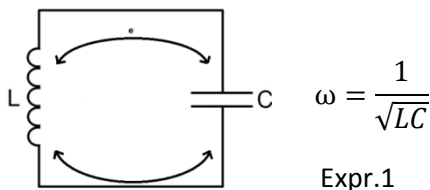
En muchas bibliografías cuando hacen referencia a la banda de los Terahercios se refieren como el “THz Gap”. Esto tiene una explicación, se ha dedicado mucha investigación para “llenar” este agujero durante muchos años.

Como ondas electromagnéticas, las ondas de Terahercios tienen unas propiedades y comportamientos que siguen a las ecuaciones de Maxwell, como cualquier otra onda. Sin embargo en el lugar donde están del espectro radioeléctrico son más difíciles de tratar que sus adyacentes.

Históricamente, la investigación en ondas electromagnéticas fue dividida en dos campos diferentes, la parte óptica y la electrónica. Los principios, métodos y equipos que se usan son muy distintos entre ambos campos. La banda de los Terahercios, está en tierra de nadie, las aproximaciones que se podían hacer con ondas ópticas o eléctricas no podían estar en el verdadero régimen de los Terahercios. A lo largo de los años se ha desarrollado nuevas técnicas y nuevos equipos para conseguir trabajar en esta banda. [2,3]

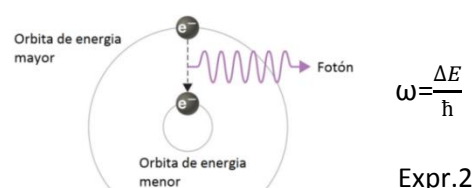
#### Óptica vs electromagnética

Movimiento clásico del electrón



Img.1

Transición del electrón



Img.2

La energía del fotón es directamente proporcional a la frecuencia, esto implica que es inversamente proporcional a la longitud de onda. Este vínculo nos lo da la relación de Planck-Einstein:

$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

Expr.3

$$E(\text{eV}) = \frac{1.2398}{\lambda(\mu\text{m})}$$

Expr.4

Donde;

- E es la energía del fotón
- h es la constant de Plank,  $6.626 \cdot 10^{-34}$  J·s
- c es la velocidad de la luz en el vacio,  $3 \cdot 10^8$  m/s
- $\lambda$  es la longitud de onda
- $1\text{eV} = 1.602\ 177 \times 10^{-19}$  [J]

El campo eléctrico es producido por un conjunto de cargas puntuales, generado por un flujo en movimiento de portadores. Las fuentes de RF convencionales no pueden generar frecuencias muy altas por encima de centenares de GHz, porque el movimiento de los portadores no puede seguir la velocidad de oscilación de los THz, tenemos un incremento de pérdidas según  $\sqrt{f}$ . En detección, los fotones de la luz en Terahercios tienen una energía tan pequeña, algunos meV, que la energía térmica a temperatura ambiente del dispositivo electrónico la supera ( $h\nu < kT$ ), por lo que el ruido térmico es mayor que la amplitud de la señal en detectores convencionales.

En la mayoría de casos la luz se transmite a partir de las transiciones entre los diferentes estados de energía. Las ondas de Terahercios tienen una energía de fotón muy baja [4]. Ejemplo:

$$1\text{THz} - T=1\text{Ps} - \lambda=300\mu\text{m} - 4.1\text{ meV} - 47.6\text{ K} \quad \text{Ej.1}$$

Nota: "K" es la temperatura en Kelvin calculada como "  $T = \text{Energía del fotón [J]} / \text{Constant de Boltzmann} = 1.38064852(79) \times 10^{-23} \text{ [J} \cdot \text{K}^{-1}]$ ".

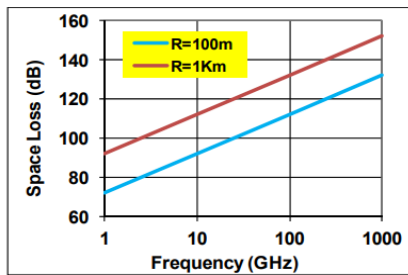
La relajación térmica puede dificultar la distinción entre los dos estados, esta diferencia de energía es igual a la energía del fotón de THz. Otro ejemplo de incompatibilidad es en las ondas guiadas, se usan guías de onda metálicas para transportar ondas microondas pero estas tienen mucha atenuación en la banda de THz, mientras las guías de ondas construidas con dieléctricos y fibras ópticas sufren altas pérdidas y dispersión.

## 1) Generadores

Los generadores en la banda de Terahercios son de potencias muy débiles. La potencia de pico alcanzado es muy baja en comparación con las fuentes de otras partes del espectro.



## 2) Medio



La atenuación en la transmisión de las ondas de Terahercios en la atmósfera es desafortunadamente abismal. Esta es una gran limitación para desarrollar la tecnología THz para comunicaciones masivas o aplicaciones de larga distancia. En la práctica se deberá de trabajar con antenas con un alto rendimiento, ya que como podemos observar en el gráfico se puede perder 132dB en 100m en 1THz [1].

Img.3 Terahertz (THz) Wireless Systems for Space Applications, NASA

## 3) Detectores

Los detectores de Terahercios se enfrentan a un gran problema al distinguir la radiación de Terahercios de su propia radiación térmica. La mayoría de los detectores de THz necesitan nitrógeno líquido o helio para enfriarlos y reducir el ruido térmico. Un cuerpo negro a temperatura ambiente emitiría 6 THz de radiación (¡esto nos incluye a nosotros!).

Vamos a calcular que energía de GAP debemos tener si queremos construir una fuente óptica para la banda más alta de los Terahercios, por ejemplo 10THz.

$$E_g = h \cdot f = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ [J}\cdot\text{s]} \cdot 10 \cdot 10^{12} \text{ [s}^{-1}\text{]} = 6.626 \cdot 10^{-21} \text{ [J]}$$

Sabemos que un electrovoltio equivale a  $1.602 \cdot 10^{-19} \text{ [J]}$ , por lo tanto tendremos una energía de Gap de  $4.135 \cdot 10^{-2} \text{ [eV]}$ . Si ahora hacemos el mismo calculo pero para la banda más baja, 300GHz obtendremos una energía de Gap de  $1.240 \cdot 10^{-3} \text{ [eV]}$ .

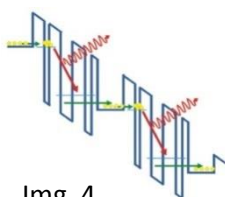
Frecuencia	Energía de GAP
0.3 THz	1.24 meV
10 THz	41.35 meV

Tabla 1

Los valores de energía están por debajo de las transiciones de estado de los átomos y moléculas!

Para abordar este problema nos encontramos con tres posibles soluciones:

- 1- QCL
- 2- Rectificación óptica
- 3- Fotoconductividad



Img. 4

El láser de cascada cuántica (QCL) se diferencia del diodo láser convencional en que depende de la emisión de fotones solo dentro de la banda de conducción. Los electrones siguen una "cascada" del punto más alto al más bajo del nivel de energía de los pozos cuánticos. Este proceso genera longitudes de onda que están controladas por el grosor de estas capas, por lo tanto, se pueden diseñar para que caigan dentro de la banda de Terahercios sin tener que cambiar propiedades ópticas específicas de los materiales semiconductores. Por contra

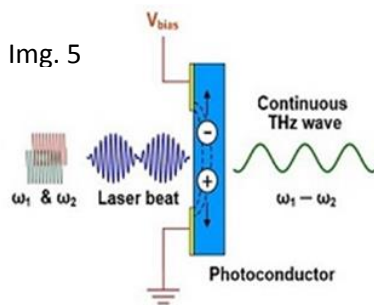
debemos trabajar en condiciones criogénicas (temperaturas más bajas de la ebullición del nitrógeno, -195.79°C) cosa que hace que el sistema sea más complejo y caro. [2]

Otra estrategia sería el proceso no lineal óptico llamado rectificación óptica. Es un proceso no lineal donde el campo óptico genera una frecuencia más baja a partir de un medio no lineal y un campo eléctrico externo que modifica el vector de polarización.

$$\vec{P} = \epsilon_0(\chi_e^{(1)} \cdot \vec{E} + \chi_e^{(2)} \cdot \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2) \quad \text{Expr.5}$$

Finalmente, nos encontramos con la fotoconductividad donde nos centraremos nosotros.

### Generación del Terahercio en antenas fotoconductoras

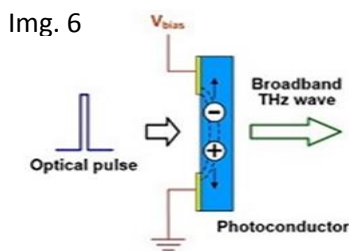


$$\frac{dn(t)}{dt} = -\frac{n(t)}{\tau} + \frac{\rho(t)}{dz \cdot hf} \quad \text{Expr.6}$$

Densidad de portadores fotogenerados, n(t)

$$J(t) = N(t) \cdot e \cdot \mu \cdot E_b \quad \text{Expr.7}$$

Densidad de corriente, los portadores son acelerados por el Bias



$$E_{THZ} \propto \frac{I_0}{(1+k \cdot I_0)^2} \quad \text{Expr.8}$$

Campo generado, THz

$$K = \frac{k(t) \cdot \eta_0}{(1+n)}, \quad K(t) = \frac{\sigma(t)}{I_0}$$

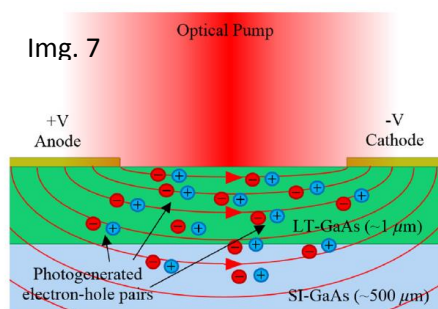
N es la densidad de fotoportadores, e es la carga elemental, μ la movilidad del electron, E<sub>b</sub> el campo electrico del Bias, I<sub>0</sub> intensidad del láser, η<sub>0</sub> la impedancia del aire, σ(t) la conductividad del sustrato i n es el indice de refracción del sustrato.

El láser tiene la suficiente energia de fotón para generar cargas libres inducidas en el sustrato. Estas cargas son conducidas por el campo del Bias a través del GAP produciendo la fotocorriente [4].

### Detección

Para la detección, el procedimiento es el efecto contrario. La incidencia del campo de THz con la generación de portadores debía a un campo óptico proporciona una corriente continua.

## 2.2. Fotoconducitivdad



N.M. Burford, M.O. El-Shenawee, Review of terahertz photoconductive antenna technology, Opt. Eng. 56 (1) (2017) 010901/1–01090120.

La antena fotoconductor es el componente más frecuente en la generación y detección de THz. La generación y detección se genera por fotoportadores en transición inducidos con pulsos láseres ultrarrápidos [3].

La antena consiste en dos electrodos de metal por encima de una capa de sustrato semiconductor con una separación, GAP, entre ambos.

Se aplica un voltaje entre los electrodos (Bias), la energía eléctrica se conserva en el área del GAP. El pulso ultrarrápido actúa como un interruptor transitorio para abrir la reserva de energía eléctrica y liberarla en forma de pulso de THz. La polarización de la onda de THz radiada es paralela al campo producido por el Bias, que este es perpendicular al conductor “strip”. Se podría alterar la polarización cambiando la polarización del Bias.

Normalmente la energía de fotón de la excitación óptica es mayor que el GAP del sustrato.

$$\text{Photon energy } hf > E_g \quad \text{Expr.9}$$

Ejemplo, usando un sustrato GaAs; GaAs:  $E_g = 1.42 \text{ eV (300k)} \rightarrow \lambda < 874 \text{ nm}$

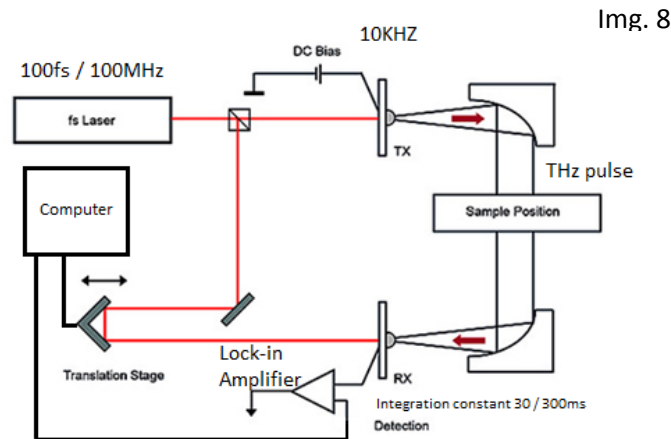
Nuestro sistemas trabajan a 850 (Frequency-Domain) y 780nm (Time-Domain).

## 3. Descripción de los equipos TD y FD

La generación de Terahercios con medios optoelectrónicos necesita de una luz infrarroja producida por un láser que genera portadores de carga libre en un semiconductor. Los portadores de carga son acelerados por campos eléctricos internos o externos y la fotocorriente resultante se convierte en la fuente de la onda de Terahercios. El sistema de radiación de Terahercios por pulsos se genera con un láser femtosecond. La configuración típica de este sistema se basa en un láser por pulsos que se divide en dos caminos; el primero viaja hacia el emisor y el segundo pasa por un sistema retardador para posteriormente ir hacia el receptor.

Los pulsos ultracortos del láser al llegar al emisor producen una corriente transitoria, como resultado, se generan paquetes de ondas electromagnéticas con un amplio espectro, los Terahercios. El campo de THz se genera proporcional a la derivada en el tiempo de la corriente fotoeléctrica.

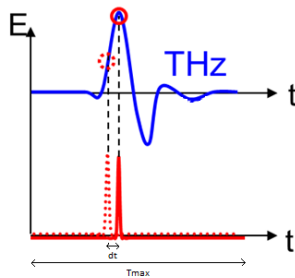
El detector funciona con la técnica bomba-sonda (pump and probe). El pulso de Terahercio incidente en el detector cambia las propiedades del material (ej. Conductividad o refracción) y el pulso que llega del segundo camino del láser detecta este efecto. Una etapa de retardo escanea el paquete de ondas de Terahercios con el pulso sonda. Después con la ayuda de la transformada de Fourier conseguimos obtener el espectro.



Img. 8

**Retardador mecánico**

Nos determina la diferencia entre muestras (dt) y el tiempo máximo de observación, Tmax. Existe un compromiso con el tiempo de adquisición y una buena representación.



Img. 9

En nuestro sistema TERA K8 el retardador consta de un sistema móvil, podemos hacer unos cálculos para conocer entre que longitudes trabaja.

Conociendo el valor Tmax facilitado por el fabricante, 300ps podremos calcular la distancia máxima, recordamos que la propagación del láser es a través del aire.

$$L(m) = v(m/s) \cdot \tau(s) \quad \text{Expr.10}$$

$$L_{max} = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \cdot 300 \cdot 10^{-12} s = 9cm$$

Rdo. 1

Si queremos conocer la distancia mínima partiremos del muestreo de los impulsos del retardador. Nuestro TERA K8 dispone de un láser femtosegundo a 780nm, concretamente a 120fs. El retardo mínimo aproximadamente sería de 120fs, menor no podría ser ya que nos lo impide la periodicidad del láser.

$$L_{min} = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \cdot 120 \cdot 10^{-15} s = 36 \mu m$$

Rdo. 2

No es ningún inconveniente conseguir una longitud de 36 μm mecánicamente es posible. Ahora ya sabemos entre que valores se mueve el retardador.

El valor del diferencial de frecuencia se calcula como la inversa del Tmax y nos indica la resolución frecuencial del sistema;

$$df = \frac{1}{T_{max}} = \frac{1}{300 \cdot 10^{-12}} = 3GHz$$

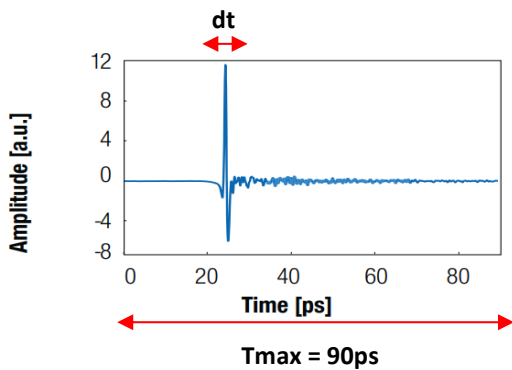
Rdo. 3

La frecuencia máxima de trabajo del sistema se calcula como la inversa del diferencial de tiempo:

$$f_{max} = \frac{1}{dt} = \frac{1}{120} \cdot 10^{15} = 8.3 \text{ THz} \quad \text{Rdo. 4}$$

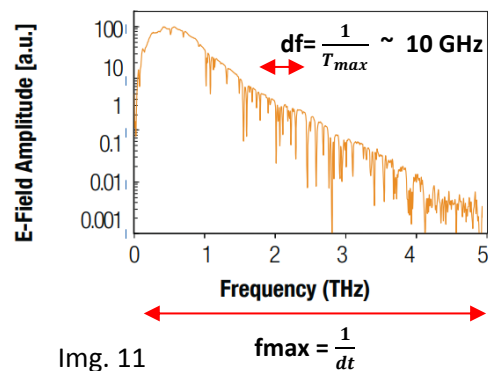
Este valor no coincide con las especificaciones del sistema, el fabricante nos dice que podemos operar por encima de los 3.5THz. Este límite lo establece el material fotoconductor de las antenas. La  $f_{max}$  nos determina el valor de muestreo, según el criterio de Nyquist tendríamos una frecuencia de muestreo como máximo de  $2 \cdot f_{max}$ .

**Pulso THz medido en la atmosfera**



Img. 10

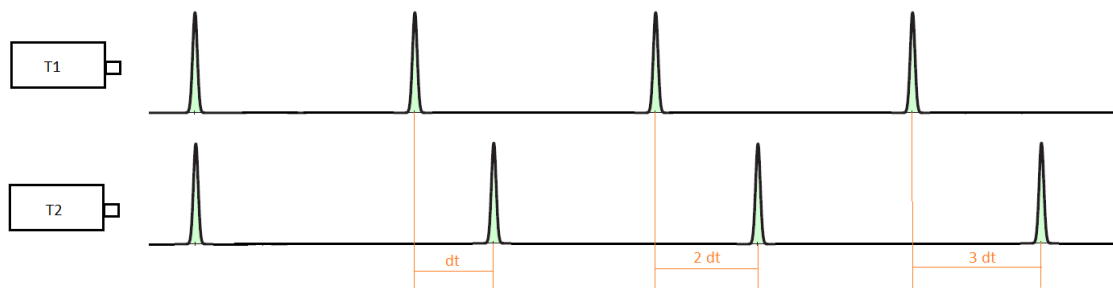
**Espectro THz calculado**



Img. 11

Cabe destacar que en este sistema se incorpora intrínsecamente la información de la fase, ya que es necesaria para hacer la transformada de Fourier y obtener el espectro que es nuestro objetivo.

Uno de los problemas de este sistema es el retardador mecánico, este nos limita el tiempo entre muestras y por consecuencia el rango espectral, y también el tiempo necesario para hacer obtener un espectro. Este dispositivo al ser una pieza mecánica necesita un cierto tiempo para ajustarse. Si queremos un rango frecuencial mayor debemos acortar el diferencial del tiempo y para ello necesitaríamos que disminuya el tiempo del retardador entre pasos. Al no ser posible ya que físicamente es difícil de conseguir tiempos tan pequeños existe otra alternativa con dos láser femtosecond sincronizados y con periodos diferentes  $t$  y  $t+dt$ . La figura muestra el funcionamiento de la técnica de retardo electrónico que es la base del nuevo sistema de Menlo System.



Img. 12

La diferencia entre periodos de los dos láseres está limitada cerca de los 0.3ps, se podría mejorar con un pulso rectangular cerca de los 0.12ps.

Si este método nos permite obtener un  $dt=0.3ps$  tendremos una  $f_{max}=3.3THz$  con la ventaja de que será mucho más rápido que con el sistema mecánico.

En el anexo se explica cómo obtener datos con un programa hecho con Matlab con el equipo TERA K8 de Menlo.

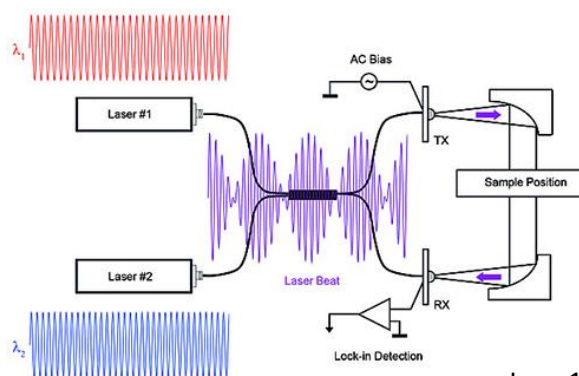
### Generación Terahercios en Frequency-Domain

La radiación de Terahercios de onda continua (CW) se obtiene mediante heterodinaje óptico en fotoconductores con un gran ancho de banda. La salida de los dos láseres es convertida a una radiación de Terahercios, exactamente a la diferencia de frecuencia entre los dos láseres.

$$df = -\frac{c}{\lambda_0^2} d\lambda \quad \text{Expr.11}$$

El componente más relevante son los “photomixer”, una estructura microscópica de metal-semiconductor-metal. La luz infrarroja ilumina esta estructura en dos frecuencias adyacentes, aplicando un voltaje de polarización a los electrodos de metal generamos la fotocorriente que oscila a la frecuencia de Terahercios. El photomixer está rodeado de una estructura que se comporta como antena y es la que nos permite convertir la oscilación de la fotocorriente a una onda de Terahercios.

Los photomixers se constituyen de GaAs or InGaAs/InP y requieren una longitud de onda del láser por debajo de la banda prohibida del semiconductor (ej. Cerca de 0.8  $\mu m$  o 1.5  $\mu m$  respectivamente) [14].



Img. 13

Principio de generación onda Terahercio en el dominio frecuencial

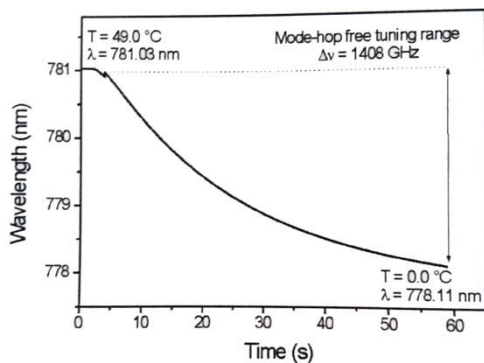
Los dos láseres DFB se ajustan frecuencialmente mediante el control de temperatura, es una tecnología actualmente efectiva en términos de coste, sobre todo si trabajamos a 1550nm, que es la longitud de onda típica en comunicaciones, debido a las economías de escala que se generan cuando los dispositivos disponen de un amplio mercado. En nuestro sistema disponemos de dos láseres, uno a 853.4nm y el otro a 855.5nm [7,8].

Control de frecuencia:  $\Delta\lambda/\Delta T \sim 0.1 \text{ nm / grado}$  Rdo. 5

$\lambda_0$	$\Delta\lambda/\Delta T$	df
850nm	0.1 nm / °C	~41.5 GHz/ °C
1550nm	0.1 nm / °C	~ 12.5 GHz/ °C

Tabla 2

Puesto que el mecanismo físico de sintonía de los láseres permite un cierto margen de control en de lambda, en la siguiente sección se explica este mecanismo, la desventaja de subir la longitud de onda de trabajo es que el margen de frecuencias que se puede barrer es menor. Entre la oferta de Toptica, los márgenes especificados para el sistema TeraScan 780 es de 2THz, en cambio el TeraScan 1550 llega hasta 1.2THz. Toptica permite la posibilidad de utilizar 3 láseres para ampliar el margen de frecuencias que se puede barrer.

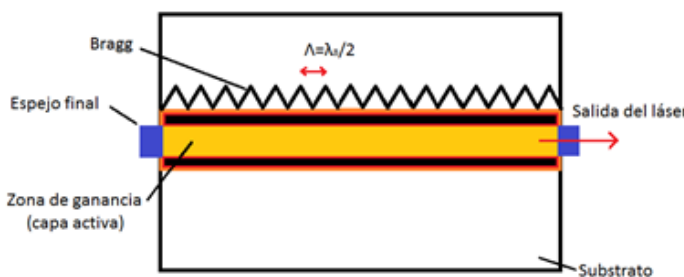


Img. 14

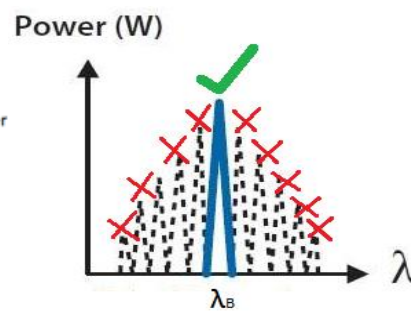
La ventaja de controlar la frecuencia por temperatura es que tenemos un rango de salto de exploración extremadamente grande, se puede llegar hasta 1400GHz en tan solo unos 60s.

Podemos observar la curvatura del ajuste de frecuencia por temperatura de un láser DFB @780nm. La temperatura decrece de 49°C a 0°C con un salto de más de 1400GHz.

**Interior del láser DFB:**



Img. 15

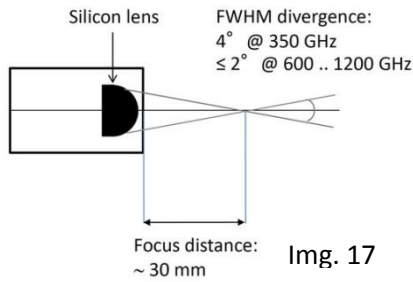


Img. 16

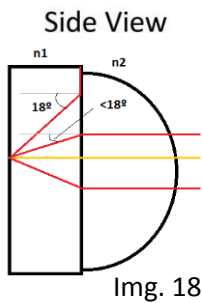
La estructura de nuestro láser DFB consta de una rejilla de difracción, conocida como Bragg dentro de la zona activa del diodo, la que permite obtener la salida de un único modo, eliminando las otras componentes que no deseamos.

Con esta tecnología podemos alcanzar valores de decenas de MHz de resolución. En nuestro caso tenemos una resolución de 10MHz y un rango hasta 1.8THz. La velocidad de ajuste frecuencial puede llegar hasta 0.1THz/s [11].

GaAs Photomixers



Img. 17



Img. 18

perfectamente colimado que no se disperse con la distancia. Disponen de una lente de silicio para asegurar la eficiencia de adaptación entre el substrato de la antena y la radiación de THz. La distancia focal es de 3 cm, es decir para una medida de una muestra esta debe de estar en medio, con una separación entre antenas de 6 cm.

Calculando el ángulo crítico según la ley de Snell, nos indica que se producirá reflexión total para cualquier rayo incidente de más de 72°.

$$\sin\Theta_c = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{3.23} = \frac{1}{3.23}, \Theta_c = 18^\circ \quad \text{Rdo. 6}$$

**Lock-in detection**

Utilizaremos un amplificador para foto diodos en concreto la variante Photo Diode VIS. Nuestro PDA 100 [10] es ideal para la amplificación de corrientes de fotodiodos muy bajas, teniendo un ruido muy bajo. Dispondremos de un ajuste de ganancia de 6 niveles que debemos ajustar el mismo nivel en el software, sino la medida sería incorrecta. Este equipo hace la función de transimpedancia, convierte la corriente a un voltaje, luego tiene una serie de etapas donde se podrá controlar la ganancia, el offset, la atenuación y un paso por filtros.

Es muy importante ajustar el Offset ya que si lo tenemos muy alto podríamos saturar en la amplificación y obtendríamos un nulo en la salida alterna de la señal. Un parámetro importante, veremos más detalles en el anexo, es el tiempo de integración del lock-in que para tener una buena interpretación lo fijaremos en 300ms, lo cual mejorará la precisión pero nos aumentará el tiempo necesario para obtener un barrido.

**Detección coherente de la señal en CW**

En el esquema de detección coherente tenemos como receptor de Terahercios un segundo photomixer. Una situación similar a la que teníamos en el sistema pulsado, las dos ondas de Terahercios, la original y la iluminada por el receptor. La entrada de una señal de Terahercio genera un voltaje en la antena mientras el láser modula la conductividad del photomixer. El resultado, la fotocorriente, típicamente en el rango

**Estructura de las antenas**

En nuestro equipo disponemos de dos antenas, emisión, recepción de tipo GaAs en formato Log spiral de polarización circular [14].

Su ancho de banda es de 3THz y admite una potencia de Terahercio de 2μW a 100GHz y 0.3μW a 500GHz. Con un rango dinámico de 80dB a 100GHz.

Al tener un rango de trabajo tan grande debemos de maximizar la eficiencia de la antena para todas las frecuencias. También nos interesa un haz



de nanoamperios, es proporcional a la amplitud del campo eléctrico incidente de Terahercios.

## Time-Domain vs Frequency-Domain

### Ancho de banda mayor con el Sistema pulsado

El sistema pulsado ofrece la ventaja de tener un ancho de banda mayor en el espectro. Usando fotoconductores podemos alcanzar valores más allá de 5THz, con emisores de cristal incluso podemos llegar a 10 THz.

El sistema del dominio temporal nos permite medir el espesor, por ejemplo en componentes plásticos, las capas que forma un pintado de un material donde la información de la profundidad es obtenida por la técnica time-of-flight. El amplio espectro se traduce en una resolución de espesor a nivel de micras.

### Mejor resolución con el sistema de onda continua (cw)

El sistema del dominio frecuencial se prefiere para aplicaciones que requieren una resolución espectral muy alta. Mientras el sistema pulsado ofrece una resolución a nivel de 10 GHz, el sistema cw nos permite unos pocos megahercios.

Además, los sistemas de onda continua permiten mediciones espectralmente selectivas, lo que hace posible ampliar una zona espectral (por ejemplo, para medir la fuerza de una sola línea de absorción en un proceso industrial). En términos de complejidad del sistema, los sistemas de dominio de frecuencia no requieren una etapa de retardo, por lo tanto, el precio es más bajo que el de sus homólogos de pulsos.

Especificaciones	Frequency-Domain	Time-Domain
Ancho de banda	0.05 – 1.8 THz	0.1 – 3.5 THz
Tipo de antena	Log-spiral	Estructura en dipolo simple
Resolución frecuencial	<10 MHz	3.3 GHz
Selectividad espectral	Sí	No
Tiempo de medida	Minutos a horas, dependiendo de la resolución y el tiempo de lock-in	Milisegundos a minutos, dependiendo del número de muestras

Tabla 3

## 4. Medidas y resultados

### 4.1. Laboratorio – Frequency Domain

#### Fotocorriente de las antenas y espectro del láser

Después de conocer los procedimientos y el set-up del equipo vamos hacer la medida de la fotocorriente de los dispositivos PCA's [9] y obtener el espectro de nuestros DFB's. Si todo va bien deberíamos conseguir los valores que marca el fabricante [6].

Nuestro equipo para realizar las medidas constará de un BNC Breakout Box (Toptica® #EE-000722), un multímetro (Agilent 34401A) y el Sistema de Terahercios de onda continua de Toptica®).



Img.19 Agilent 34401A

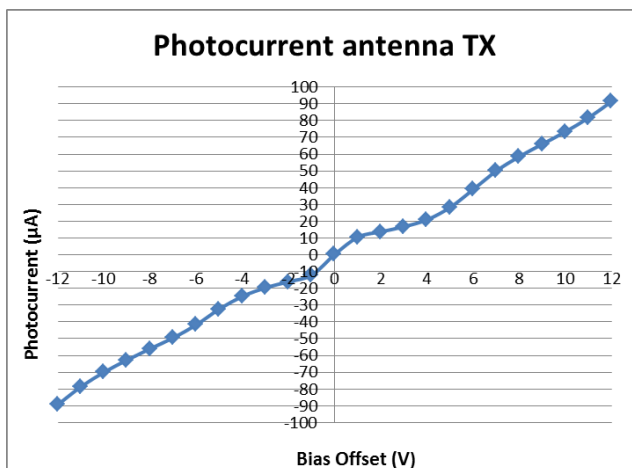


Img.20 BNC Breakout Box

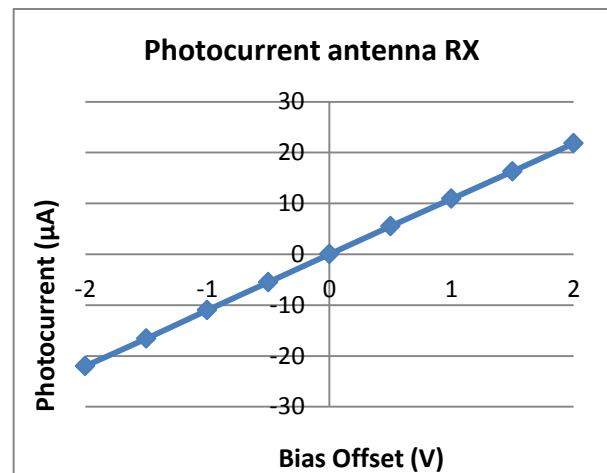


Img.21 DFB DL100

Necesitamos comprobar que nuestras antenas fotoconductoras (Tx/Rx) estén funcionando correctamente. Una manera directa de testear su estado es medir la fotocorriente aplicando un Bias en corriente continua. En el anexo se puede ver el procedimiento para la medida. Los resultados deberían coincidir con el valor de fotocorriente documentado (aproximadamente 950/95  $\mu\text{A}$ ) pero no los alcanzamos.



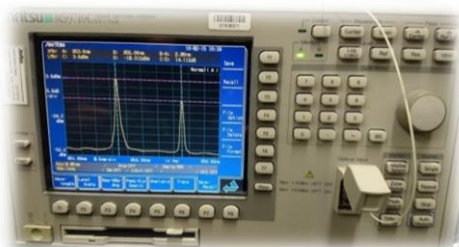
Img. 22



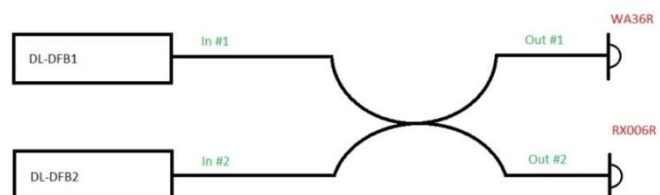
Img. 23

Nunca deberemos excedernos con el nivel del Bias. Fijaros que valores se han aplicado, 11v para la Tx y 2v para la RX. Medidas con la salida 1 del acoplador.

Ahora procederemos a observar el espectro óptico después del divisor óptico. Con el espectro óptico obtendremos información sobre cómo se distribuye la energía óptica en las diferentes longitudes de onda. Usaremos el equipo Anritsu MS9710C para llevar a cabo esta tarea.

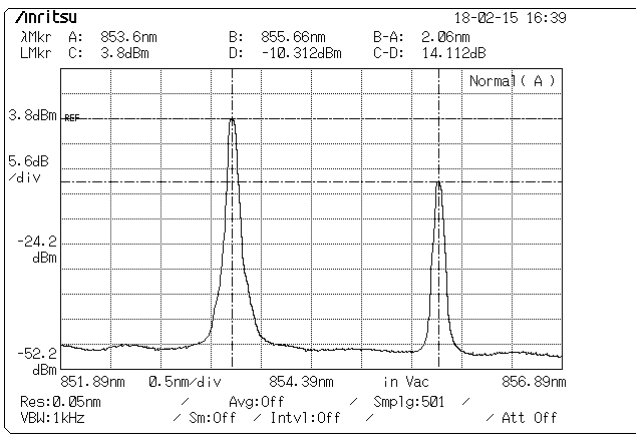


Img.24, Img.25 Analizador de espectro óptico, Anritsu MS9710C / Diagrama de las conexiones ópticas de nuestro sistema de THz

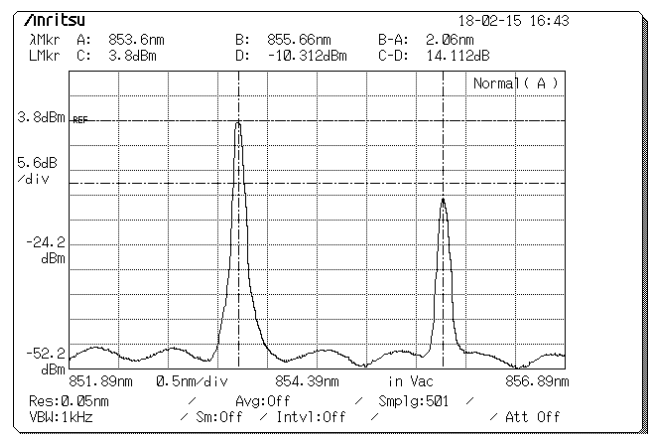


Hay dos salidas después del divisor óptico, en nuestro caso; desconectaremos la salida #1 que está conectada a la antena TX y la conectaremos a la entrada del analizador óptico, también podemos usar la segunda salida y el resultado debería de ser el mismo. Nuestros DFB trabajan a 855.5 nm, 853.4 nm y tienen 150 mW (21.76 dBm) de potencia (Fig.3). En las condiciones estándar de operación especificadas en el "acceptance report" se establece que en las condiciones estándar de operación, en estas salidas debe medirse un nivel de señal óptica de 54 mW para la salida 1 y 53 mW para la salida 2.

Obtenemos dos componentes frecuenciales tal como se esperaba pero nos encontramos una diferencia de 14 dB del nivel de potencia, la longitud de onda más alta tiene una menor potencia. También se observa un comportamiento distinto entre las dos salidas, la salida 2 pierde unos 3dB.



Img. 26

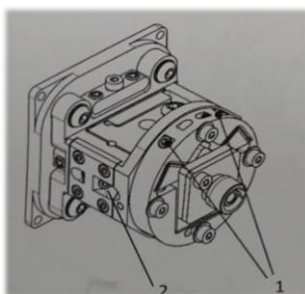


Img. 27

En la Img.26 podemos ver las dos componentes de frecuencia, a 853.6nm y 855.6nm. Como se esperaba, las frecuencias están cerca de los valores teóricos. Sin embargo, vemos un evento extraño con el nivel de potencia; tenemos 14,1 dB de diferencia entre las dos longitudes de onda.

Podemos cambiar la entrada y usar la salida #2, aparentemente no debería modificar nada, pero podemos ver que se incrementa 3dB más de diferencia, Img.27.

**Alineación FiberDock**



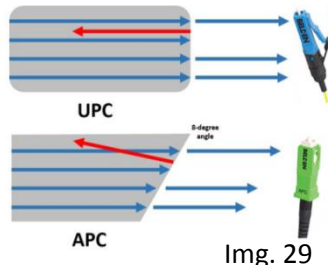
Img. 28

Nuestros láseres Toptica DL100 están conectados a una fibra a través de un FiberDock que permite conectar el láser a la fibra maximizando la potencia óptica [12]. El FiberDock es un acoplador de fibra diseñado para tener todos los grados de libertad necesarios para permitir la máxima eficacia de acoplamiento. El diseño permite usar un gran rango de lentes y tipos de fibra estándar.

Si buscamos la mejor transferencia de potencia óptica debemos alinear el FiberDock. Podemos ajustar los siguientes ejes; X, Y, Z. Una forma de hacerlo es usar un medidor de potencia o un analizador óptico.

### Ajustar potencia con la ayuda del Analizador Óptico

Después de optimizar el FiberDock obtuvimos 6dBm por cada longitud de onda medido con el Analizador óptico, antes teníamos unos 4dBm. Podemos ver una pequeña



mejora, pero no es suficiente. Estamos perdiendo mucha potencia en algún lugar de nuestro sistema. Una parte de la pérdida de potencia podría ser debido a la mala conexión entre el conector UPC del analizador óptico y el conector APC de la fibra. El conector APC tiene un ángulo de 8º, por lo que si conectamos un conector UPC, podríamos perder potencia. Por lo tanto, nuestros resultados no son buenos. Debemos encontrar un nuevo cable de fibra con conector UPC y repetir las medidas con el analizador óptico.

Otra prueba que podemos hacer es alinear el FiberDock leyendo la fotocorriente de las antenas Tx y Rx. Obtenemos valores similares respecto antes de alinear.

@TX OFFSET: 11V → 86 µA  
 Valor esperado → 1000 µA  
 Antes del alineamiento → 81.8 µA

Rdo. 7

Vemos una pequeña mejora pero no obtenemos los valores correctos. Hasta ahora, hemos alineado el FiberDock maximizando la potencia en el analizador de espectro y la fotocorriente de las antenas. Los resultados que estamos obteniendo no son correctos, están muy lejos de los valores esperados. Podemos confirmar que el sistema está bien alineado y que nuestro problema de perdida de potencia no está relacionado con la alineación.

### Prueba con CW Terahertz software

Después de ajustar el FiberDock, nos gustaría ver cómo responde ahora el sistema de onda continua, tenemos las dos componentes con el mismo nivel de potencia, aunque un nivel muy bajo. Los valores obtenidos con el programa son bastante similares a los anteriores obteniendo 0.15nA a 850Ghz, por lo que seguimos teniendo el mismo problema.

### Anritsu ML9002A medidor de potencia óptico aéreo



Este instrumento nos permite ver la potencia óptica de una manera rápida y fiable.

La potencia óptica se puede leer directamente enfocando la salida óptica a medir hacia el sensor del equipo. Esta herramienta es muy útil para encontrar si estamos perdiendo potencia en algún tramo de nuestro sistema.

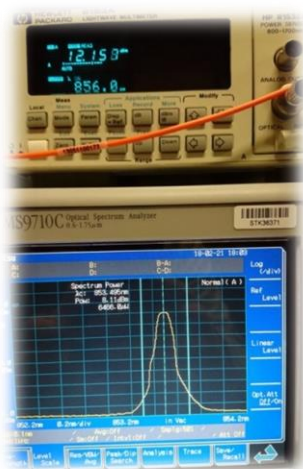
Img. 29

Obtuvimos alrededor de 54mW de potencia en la salida 1 y 30mW en la otra salida. Este resultado es la suma de la potencia de dos longitudes de onda.

El divisor tiene una pérdida en el interior normalmente en sistemas de 2x2 sobre un 20%. Es decir cada salida tiene un 40% de potencia de cada longitud de onda.

### Analizador Óptico y multímetro Óptico

Hemos conseguido otro equipo para hacer la medida de la potencia óptica, el multímetro LightWave HP 8153A. La idea es comparar los resultados de LightWave con el Analizador óptico. Uno de nuestros problemas era que lo saturábamos, el nivel máximo de medida era más bajo que nuestra potencia. Estuvimos intentando jugar con atenuadores para intentar bajar el nivel de potencia.



Img. 30

Repetimos las medidas, pero encontramos valores diferentes de los que obtuvimos anteriormente. Parece que el sistema no es estable.

a. Salida del divisor:

Fibra SMF28e+ → analizador óptico → 14.91 dBm /12.35 dBm (att.)

b. Salida del divisor:

analizador óptico → 10.41 dBm

Nota: Fibra SMF28e+ tipo APC a UPC. Nota2: Potencia total, dos longitudes de onda.

Si conectamos la salida del divisor al Analizador óptico obtenemos más pérdidas, aparentemente este comportamiento es normal teniendo en cuenta que no estamos adaptando bien el conector APC-UPC.

### Estado de las conexiones de las fibras

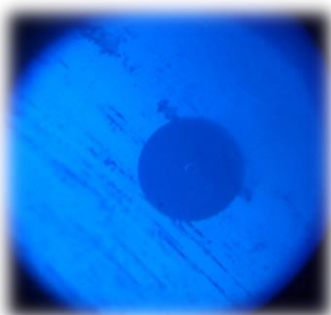


Img. 31

Hemos visto antes que el sistema se comporta de manera muy inestable. Nos gustaría revisar todas las conexiones de fibra con un microscopio para este uso. Observamos mucha suciedad en los orificios de los conectores de la fibra y lo

limpiamos con alcohol Isopropilico y toallitas especiales para el uso en equipos e instrumentos de laboratorio, así como lentes de cámaras, conectores de fibra y otros componentes electrónicos.

Limpiamos todos los conectores de fibra para ver si podíamos mejorar su aspecto. Desgraciadamente con limpiar no fue suficiente ya que se podían ver algunas pequeñas marcas que no desaparecían, era sospechoso, tal vez los conectores estaban dañados.

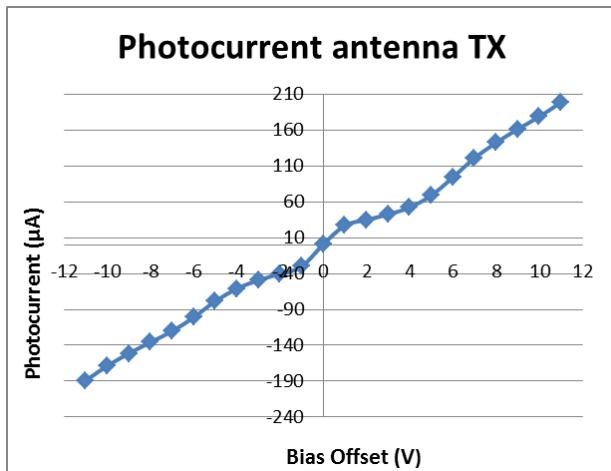


Img. 32

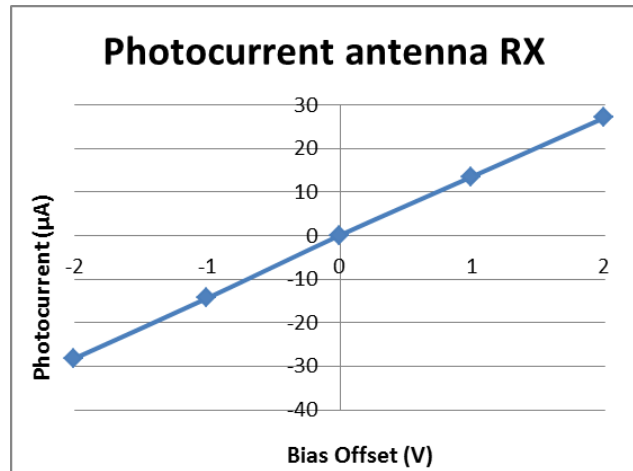
Después de la limpieza volvimos hacer las medidas de la fotocorriente con la alineación óptima encontrada anteriormente. Se pueden ver los resultados en el anexo.

Las condiciones del láser con las que trabajamos son; 148mA a 26º y 153mA a 25.2º.

Salida 1 del acoplador

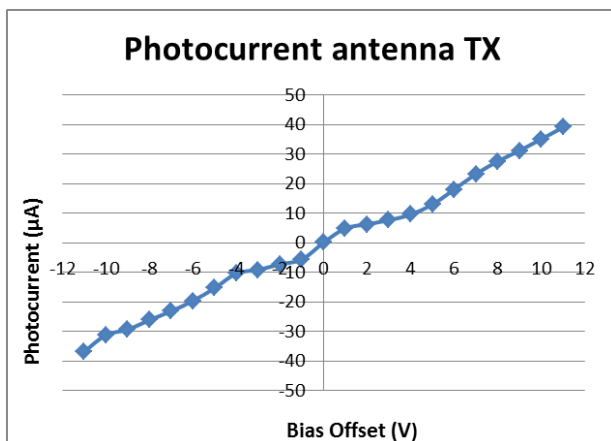


Img. 33

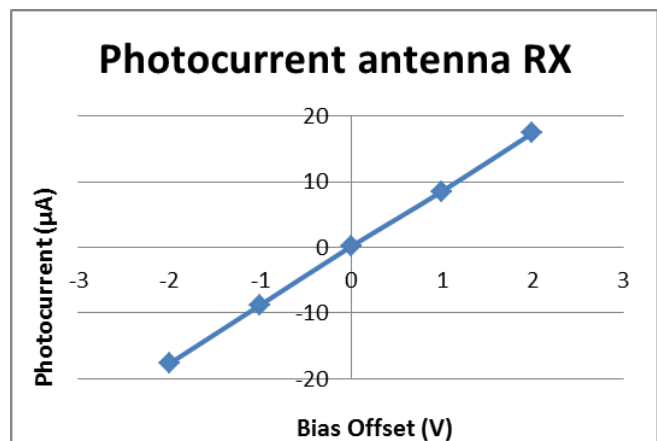


Img. 34

Salida 2 del acoplador



Img. 35



Img. 36

Antes de la limpieza con la salida 1 teníamos 81 µA y ahora tenemos 199,1 µA en la antena transmisora. La antena receptora se obtiene 28,1 µA en lugar de 22 µA, no hemos mejorado mucho. Con la salida 2 se obtienen valores muy bajos, 39.1 µA en la Tx y 17.7 µA en la Rx.

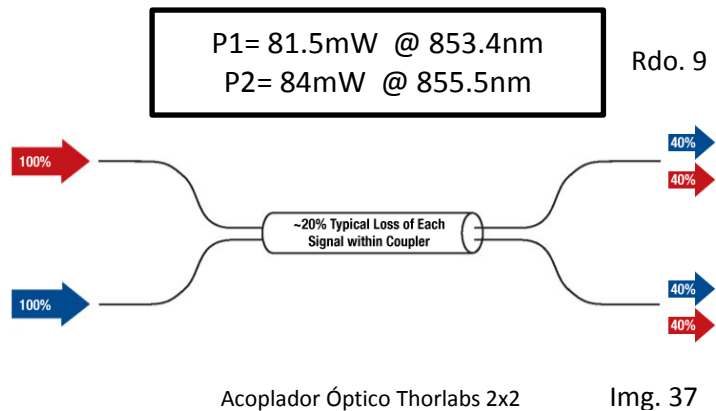
Vamos a calibrar nuevamente, pero ahora buscaremos el máximo a partir de las mediciones de la fotocorriente. Después del nuevo calibrado volvimos a repetir las medidas pero no obtuvimos ninguna ganancia. Los valores son bastante similares, volvemos a insistir que nuestro problema no se debe a una mala alineación.

Viendo estos resultados poco satisfactorios debemos de encontrar en que parte del sistema se está perdiendo potencia. Medimos la potencia óptica después del divisor con el medidor de potencia óptico manual y obtenemos las siguientes medidas:

Salida 1 = 54 mW  
Salida 2 = 30mW

Rdo. 8

Está claro que algo no funciona bien, deberíamos tener una potencia similar en las dos salidas. Nos vamos un paso más atrás y miramos con que potencia están saliendo los láseres.



En la foto anterior se puede ver un diagrama de un divisor óptico típico y su gestión de potencia, en este caso del fabricante Thorlabs.

Hasta ahora hemos visto que el divisor no es simétrico y la alineación del láser es muy importante y debe de estar optimizada.

Volvimos a conectar el analizador óptico a la salida del divisor pero usando otras fibras y vimos que la potencia óptica de 855.5nm bajo mucho. El sistema se comporta de una manera impredecible, muy inestable. Incluso se llega a hacer medidas obteniendo unos resultados que no coinciden cuando se vuelven a medir en las mismas condiciones.

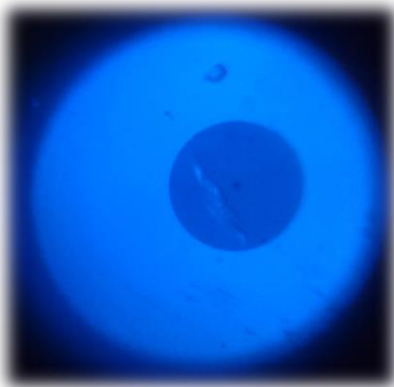
### Polarización

Si la polarización es diferente en algún punto del circuito, podríamos perder potencia. Imagine que uno de los láseres tiene una polarización diferente respecto al otro, como las fibras que usamos son del tipo PM estas bloquearían parte de la potencia. En el anexo se pueden ver el procedimiento y los resultados. Se obtiene la misma polarización a la salida del láser pero a la salida del acoplador existe una diferencia de 215°.

### Estado de los conectores

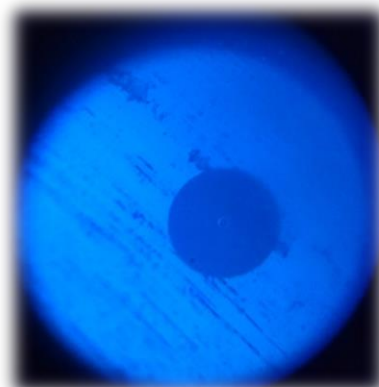
Hemos visto que existen algunas imperfecciones en los conectores de las fibras. Sabemos que un conector sucio con el uso de mucha potencia como es nuestro caso (150mW) puede ser peligroso llegando a dañar el núcleo. Tememos que podría ser una de las causas de nuestro problema. Para conocer en más detalle el estado de los conectores usaremos un microscopio. La salida 2 del acoplador es la que peor esta, esto reafirma los resultados previos donde esta salida siempre tuvo menor potencia respecto a las otras. La salida 2 no es solo la única salida que se ve en mal estado, tenemos la parte de la antena Tx y las otras con ligeras imperfecciones. Creemos que todas estas imperfecciones son responsables de que el sistema sea tan inestable. Se pueden ver más imágenes en el anexo.

Salida 1 del divisor



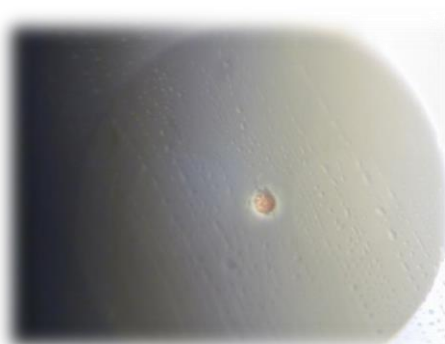
Img. 38

Salida 2 del divisor



Img. 39

Salida 2 del divisor



Img. 40

Como se puede observar en el núcleo del conector existe un agujero de dimensiones considerables. No sabemos su profundidad pero si el diámetro, un 7% aproximadamente del diámetro del núcleo de la fibra. También podemos ver restos de humedad, este aspecto no es preocupante ya que se seca pasando una toallita especial. Hay que recalcar que estos equipos están en una planta baja donde puede coger bastante humedad.

El fabricante Toptica nos recomienda el pulido del conector si la profundidad del orificio es inferior a 30  $\mu\text{m}$ . Si fuera mayor entraríamos en un terreno arenoso ya que posiblemente empezariamos a tener alguna perdida en la conexión si seguimos puliendo. Esperemos que no sea así.

### Experiencias con el pulido

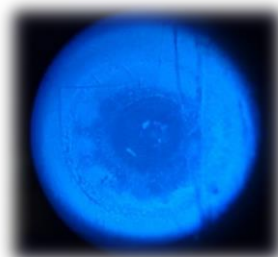
En el anexo se puede ver en más detalle las experiencias y procedimientos para conseguir el pulido del conector [13]. Primero se diseñó con la ayuda del personal de mecanización del departamento, un soporte con los 8º de inclinación para el pulido de los conectores APC. Se hizo a partir de un prolongador hembra-hembra, APC. Se consiguieron varios papeles de pulido de 30  $\mu\text{m}$ , 9  $\mu\text{m}$ , 6  $\mu\text{m}$  y 1  $\mu\text{m}$ . La idea era hacer una prueba del pulido con un conector en mal estado de alguna fibra rota. Encontramos una en muy mal estado, incluso peor que la salida 2 del acoplador. Para el pulido, primero usaremos el más grande 30  $\mu\text{m}$ , luego continuamos con 9  $\mu\text{m}$  y terminaremos con el más pequeño, 1  $\mu\text{m}$ . Esperemos que el material de la base de nuestro “disco” pulidor sea lo suficientemente resistente contra el pulido.

Base pulidora conectada a una fibra



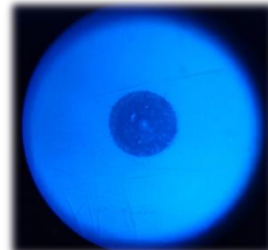
Img. 41

Estado del conector de prueba



Img. 42

Conector después del pulido



Img. 43



Como se puede observar se ha mejorado bastante. Se aprecian bastantes imperfecciones y el núcleo no es uniforme pero debemos de ser conscientes que el estado anterior era pésimo. Una vez hecha la prueba podemos intentarlo con la salida 2 del acoplador.



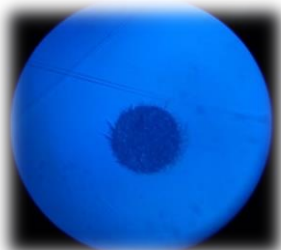
Img. 44

Mientras se utilizaba el disco pulidor vimos que el material de la base no era lo suficientemente resistente e iba dejando restos en la hoja de pulido provocando el efecto contrario al que deseábamos, nos dejaba marcado nuestro conector. Este efecto nos produce muchos arañazos, en vez de mejorar empeoramos la situación.

Pasos realizados en la salida 2 del acoplador:

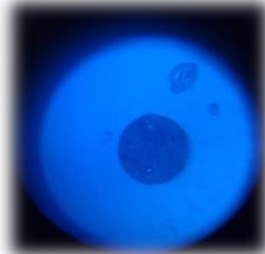
- 1- Pulidor grano de 30 o 9 micras
- 2- Pulidor grano 1 micra
- 3- Pulidor grano tipo DM (acabado)

Después de usar papel de 30µm



Img. 45

Después de usar papel de 1µm



Img. 46

Después de usar papel DM



Img. 47

Salida 2 del divisor después del pulido



Img. 48

Después de pulir el conector de fibra el agujero central ha desaparecido por lo que ahora podemos afirmar que su profundidad no era superior a 30 µm, hemos tenido suerte. Afortunadamente hemos conseguido pulir el cráter pero si observamos con más detalle detectamos algunos rasguños en el núcleo y la férula, debemos pulirlo mejor. Podríamos repetir la operación con un papel de pulido de fibra más fino. Se ha intentado

muchas veces de maneras distintas y no se ha podido mejorar debido a que la base va dejando pequeñas partículas que van rayando nuestro conector. Se decide comprar el disco de Thorlabs y un papel más fino para el acabado.

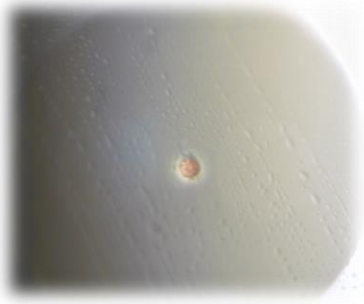


Img.49 Disco pulidor conector FC/APC-D50



Img. 50 Hojas de pulido final (0.02 µm)

Nos hemos sorprendido mucho ya que hemos obtenido los mejores resultados vistos hasta ahora. El nuevo disco no interfiere con las hojas de pulido y tenemos más control y precisión al ser de mayor tamaño. Las últimas hojas de pulido que hemos usado tienen un grano de 0.02  $\mu\text{m}$ , los resultados son increíbles. Recomendamos usar esta hoja de pulido con la ayuda de un par de gotas de agua destilada, durante el pulido si vemos que necesitamos más iremos añadiendo.



Img.51 Situación inicial



Img.52 Después del pulido con el disco hecho a mano

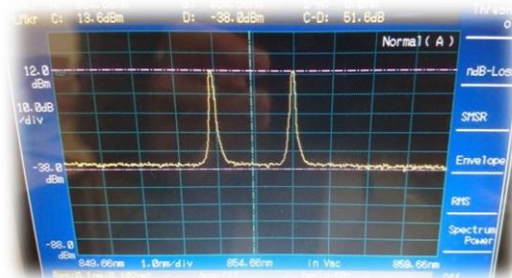


Img. 53 Después del pulido con el disco D50 y hoja de 0.02 $\mu\text{m}$

Después de encontrarnos con varios inconvenientes reflejados en el anexo finalmente obtuvimos un pulido casi perfecto. Repetiremos los pasos para las otras conexiones. Ahora no deberíamos tener problemas de pérdida de potencia óptica debido al mal estado de los conectores.

Divisor	Salida 1	Salida 2	Ganancia(dB)
Potencia antes pulido	54 mW	30 mW	2.5
Potencia después pulido	56.4 mW	55 mW	0.1

Tabla 4



Img. 54 Potencia Óptica medida con Anritsu MS9710A

Después de pulir los conectores de las fibras es hora de medir la fotocorriente de nuestras antenas. Las medidas se realizan con 11Vac de Bias en la Tx y 2Vac en la Rx.

Fotocorriente	Antes del pulido	Después del pulido	Ganancia(dB)
Out2-TX	39.1 $\mu\text{A}$	446,2 $\mu\text{A}$	10.57

Tabla 5

Fotocorriente	Antes del pulido	Después del pulido	Ganancia(dB)
Out2-RX	17.4 $\mu\text{A}$	30 $\mu\text{A}$	2,36dB

Tabla 6

Fotocorriente	Antes del pulido	Después del pulido	Ganancia(dB)
Out-1TX	199.1 $\mu\text{A}$	287 $\mu\text{A}$	1,58

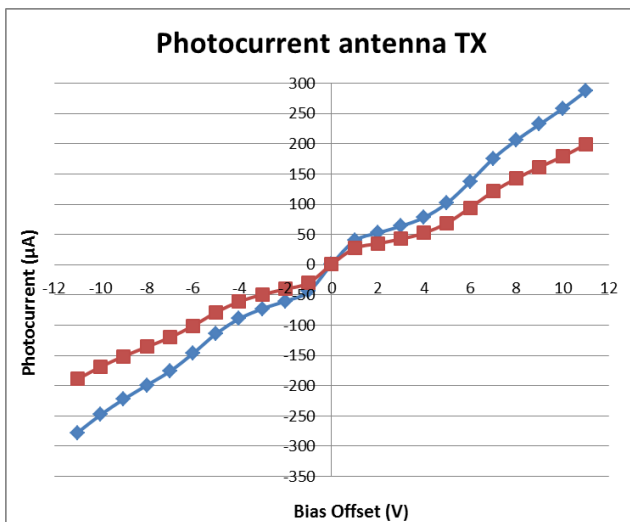
Tabla 7

Fotocorriente	Antes del pulido	Después del pulido	Ganancia(dB)
Out-1RX	27,1 $\mu\text{A}$	28,2 $\mu\text{A}$	0,17

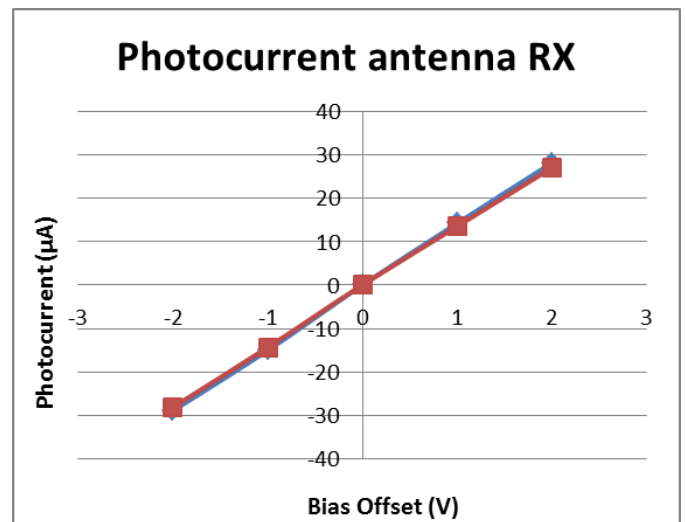
Tabla 8

Obtenemos una mejora muy notable especialmente si nos fijamos en la salida 2, pero seguimos sin obtener los resultados esperados. Por otro lado no entendemos los diferentes niveles de fotocorriente que se obtienen con las dos salidas del divisor y la misma antena. La antena transmisora con la Salida 2 obtenemos 446,2  $\mu\text{A}$  pero con la Salida 1 obtenemos 287  $\mu\text{A}$ .

Salida 1: (Rojo: Valores antes del pulido blue: Valores después del pulido)

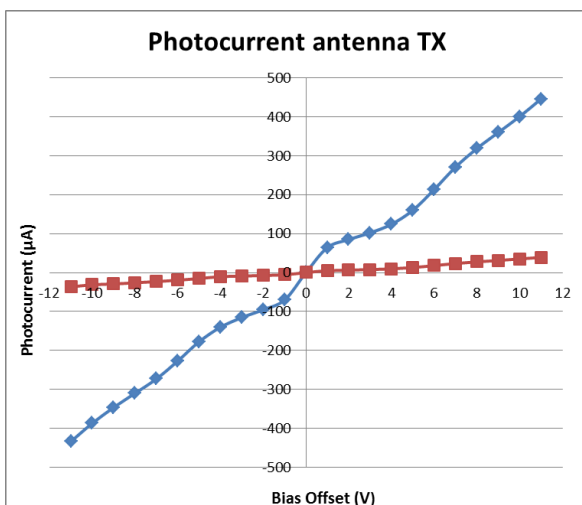


Img. 55

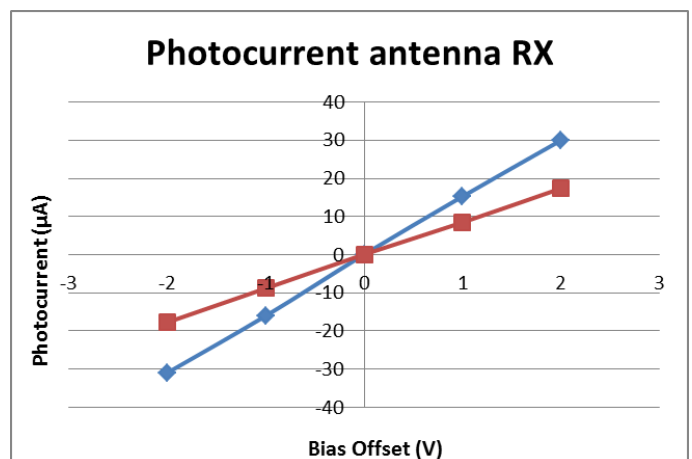


Img. 56

Salida 2

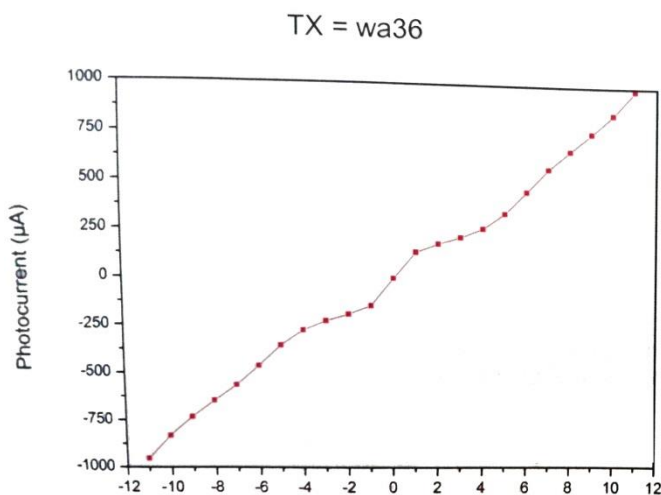


Img. 57

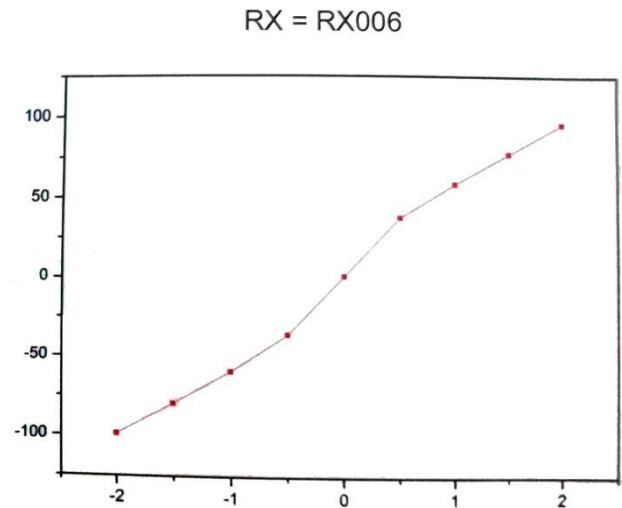


Img. 58

Valores estándar indicados por el fabricante:



Img. 59



Img. 60

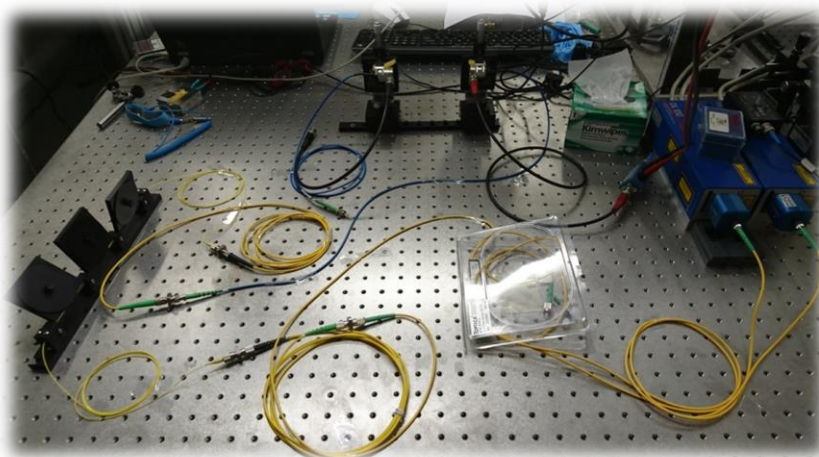
### Controlador de polarización

Nos gustaría comprobar si las dos salidas del divisor tienen la misma polarización, anteriormente se probó con una lente polarizadora y ahora usaremos un controlador de polarización.

En nuestro laboratorio tenemos el FPC560 de Thorlabs, su conexión es de tipo UPC, por lo que utilizaremos dos cables de fibra UPC-APC.

Este controlador de polarización utiliza la birrefringencia inducida por torcimiento con tres platos independientes para alterar la polarización en la fibra monomodo.

Configuramos nuestro sistema Terahertz para medir la fotocorriente de la antena, esta vez insertamos el controlador de polarización entre la salida del divisor y la fibra de la antena de entrada.



Img. 61

Cambiaremos el ángulo de las tres placas del controlador de polarización mientras haremos la medida de fotocorriente para intentar encontrar un nuevo máximo.

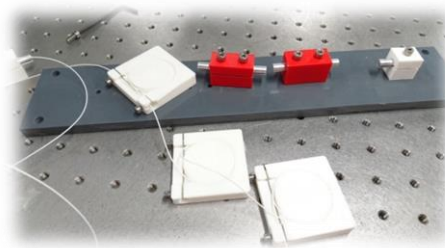
Salida	Antena	fotocorriente(uA)	Bias (Vac)
1	Tx	121,6	5
2	Tx	107,3	5
1	Rx	14	1
2	Rx	14,4	1

Tabla 9

Después de hacer las medidas notamos que nuestro sistema no mejora. Los valores máximos con controlador de polarización son más bajos que sin él.

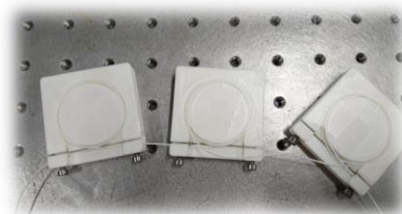
Podríamos decir que las dos salidas están bien alineadas en polarización, sin embargo, intentaremos repetir la prueba con otro controlador APC así evitaremos las adaptaciones UPC-APC.

Hemos encontrado un prototipo de controlador de polarización de fibra en nuestro departamento. Ha sido fabricado con una impresora 3D, por lo que se puede personalizar. Como ventaja tiene que le podemos instalar cualquier fibra, en nuestro caso usaremos una fibra APC-APC con los bucles que deseamos para cada disco. La cantidad de birrefringencia inducida en la fibra es función del diámetro del revestimiento de la fibra, el diámetro del núcleo (fijo), el número de bucles de fibra por disco y la longitud de onda en que trabajemos.



Img.62 Control de polarización construido con una impresora 3D

Comenzamos haciendo 2-3-2 vueltas en los tres discos con una fibra APC-APC y luego mediremos la fotocorriente. Desafortunadamente la fotocorriente de las antenas no cambia cuando movemos las paletas, esto significa que no estamos cambiando la polarización. El problema es que nuestra fibra tiene un diámetro de revestimiento inferior y el diámetro de los discos es más pequeño que el que usaba el controlador de Thorlabs, por lo que debemos usar más vueltas por disco.



Img.63 Combinación de tres discos (un cuarto de onda, media onda y cuarto de onda)

Ahora, configuramos nuestro control de polarización con 3-5-3 vueltas, respectivamente. Los resultados obtenidos son bastante similares respecto al controlador Thorlab, podemos confirmar que los pigtails no introducen pérdidas.

Salida	Antenna	Fotocorriente(uA)	Bias (Vac)
1	Tx	86 / 121,6	5
2	Tx	124/ 107,3	5
1	Rx	13,8 / 14	1
2	Rx	13,6 / 14,4	1

Tabla 10

## ¿Cómo responden las antenas a la potencia óptica?

Queremos conocer la respuesta de la fotocorriente según la potencia óptica. Si reducimos la potencia del láser vemos como se reduce la fotocorriente como era de esperar, pero lo que nos gustaría probar es incrementar muy poco a poco la potencia para ver cómo responde la antena, así descartaremos la pérdida/falta de potencia a la base de la antena. Podemos controlar la potencia a la salida del divisor, pero no sabemos la que llega a la base de la antena ya que va directamente conectada con una fibra.

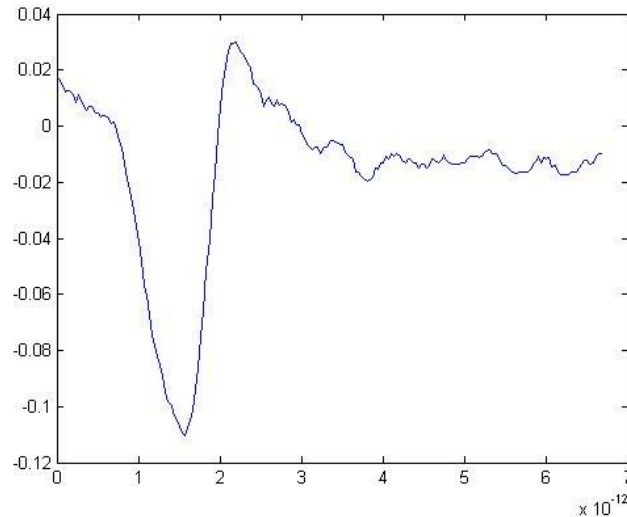
Vemos que aumentando un poco la potencia aumenta muy poco la fotocorriente, se observa que el material ya está saturando. Es muy importante no excederse mucho durante tiempos prolongados (~30mW en el chip) ya que podríamos dañar la antena. Podríamos decir que nuestro problema no se debe a la potencia del láser.

### 4.2. Laboratorio – Time Domain

Después de investigar sobre el funcionamiento del equipo decidimos hacer una prueba de funcionamiento del sistema completo. En primera instancia vimos que recibíamos poca señal y la respuesta no era la que esperábamos. En el anexo se puede ver los pasos de alineamiento y los resultados obtenidos. Llegamos a mejorar bastante la señal pero seguíamos sin conseguir los valores por defecto que marca el fabricante. Seguimos el procedimiento de alineamiento del láser hacia la antena.

#### Calibración Time-Domain

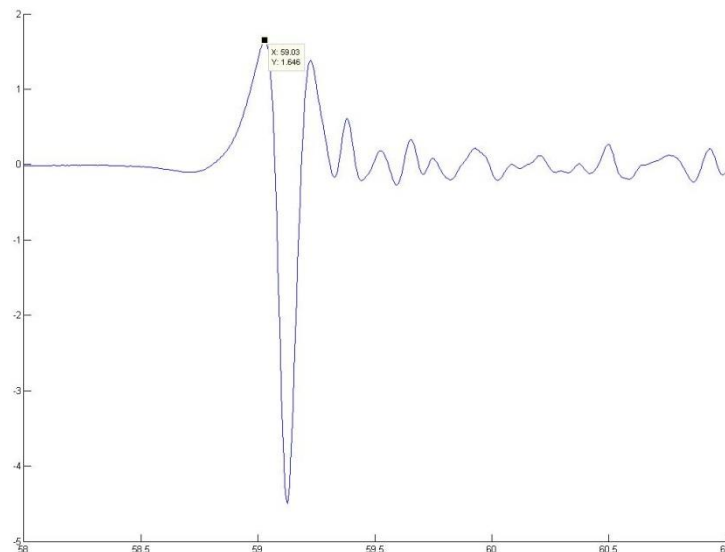
Después de tener claro el procedimiento para hacer funcionar el sistema Time-Domain hemos intentado hacer una medida sin ninguna muestra a través del espacio libre. Los resultados que conseguimos en nuestro receptor son valores muy bajos y la forma de la respuesta es diferente a la que deberíamos obtener.



Img.64 Salida antes del calibrado de espejos

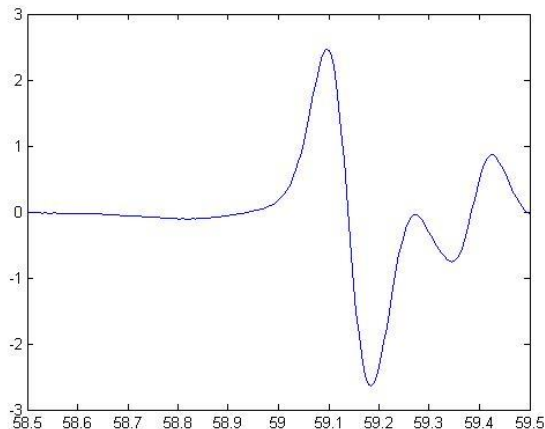
Creemos que las lentes o los espejos están mal calibrados. Ha pasado mucho tiempo des de la última vez que se utilizó este equipo y quizás no dispongan de un ajuste óptimo. Es fácil mover un posicionador sin darse cuenta.

Finalmente decidimos calibrar todos los espejos del sistema, tras tenerlo lo mejor posible volvimos a repetir la medida y el resultado fue el siguiente;



Img.65 Salida después del calibrado de espejos

Como se puede observar el nivel ha aumentado pero no obtenemos la respuesta que queremos. Otros ajustes que podemos cambiar y que podrían estar afectando son las alineaciones de las lentes. Decidimos ajustar todas las lentes juntamente con los espejos para obtener la mejor respuesta.



Img.66 Salida antes del calibrado de espejos

Después de calibrar la lente y los espejos, obtenemos un gráfico similar al que queremos. Ahora, podemos ver dos picos altos y son más simétricos pero no acabamos de conseguir el valor nominal esperado.

### Calibrar Time-Domain

A continuación se explica cómo se llevó a cabo la calibración, el código completo se muestra en el anexo.

En la ruta siguiente encontraremos el código de Matlab con el nombre "test\_new";  
C:\Users\TeraK15Kit\Documents\MATLAB\Terahertz\Routines\  
Una vez ejecutado el archivo, podremos mover el motor para situar la muestra justo en el medio de la estructura. El motor es del tipo paso a paso, es decir se le envían unos impulsos eléctricos y este lo convierte en movimiento.

En nuestro caso le enviamos las siguientes instrucciones para situar la muestra justo en medio de la estructura;

```

moveY(40)
moveY(38)
moveY(30)
moveY(20)
moveY(0)
moveX(80)
moveX(60)
moveX(40)
moveX(10)
moveX(0)

```

Cod.1

Cuando tenemos la estructura bien situada y hemos sujetado la muestra a medir podemos continuar con la medida de una muestra en una posición determinada siguiendo estos pasos;

```

movTHzStageDistance(posInMillimeters)
getsampleDAQ

```

Cod.2

Con ello nos dará el valor numérico en el terminal, si deseamos hacer un barrido y representarlo gráficamente podemos seguir los siguientes pasos:



```

[t,p,x]=fineMeasurement(startpos,stoppos,0.005);
figure(1)
plot(x,p)
    
```

Cod.3

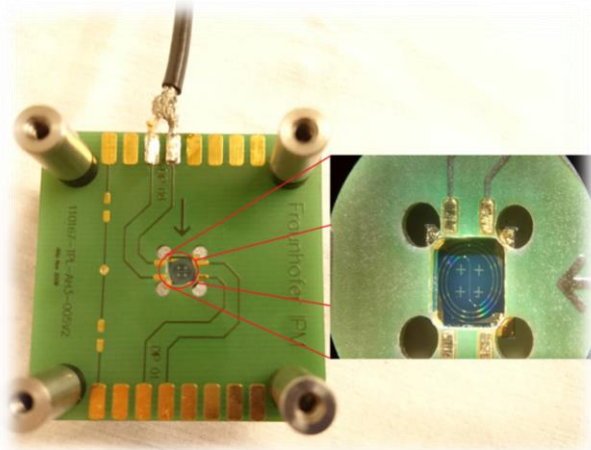
Para calibrar el sistema primero hicimos un barrido para detectar el pico máximo y luego nos fijamos en ese punto para maximizarlo. Para hacer el calibrado de una forma más cómoda se realizó un bucle.

```

movTHzStageDistance(59.03)
getsampleDAQ
while 1, getsampleDAQ, pause (0.1), end
    
```

Cod.4

Debemos ir con mucho cuidado con el movimiento del motor ya que la estructura que sujeta la muestra puede colisionar un soporte. Siempre que sea posible utilizaremos el comando “fineMeasurement” ya que obtendremos mejores resultados que fijando una velocidad con el “fastMeasurement”.



Img. 67

láser.

Como se puede observar en la fotografía existen 4 cruces y un circuito en forma de espiral, estos elementos nos irán bien para acabar de alinear. Para hacerlo encenderemos el láser y en un ambiente totalmente oscuro iremos moviendo la posición de los diferentes espejos hasta localizar en qué punto nos encontramos. Lo podremos ver por la reflexión que provoca la luz hacia un trozo de papel situado cerca de la antena pero sin tapar el haz de luz que le viene del

Repetimos varios días este alineamiento sin obtener resultados satisfactorios, parecía que estaba bien alineado pero seguíamos viendo poco más que ruido, algo contradictorio ya que las primeras pruebas fuimos capaces de ver algún nano amperio.

Posteriormente decidimos desmontar todo el sistema y centrarnos en las antenas. La idea era comprobar que se generara la fotocorriente correctamente para descartar esa parte del sistema. Con todo el sistema montado el GAP de las antenas es de  $5\mu\text{m}$  por lo que se hacía bastante complicado tenerlo todo ajustado, por este motivo se desmontó y se probaron las antenas por separado.

Con la antena separada del sistema medimos la fotocorriente apuntando un láser hacia el GAP, la sorpresa fue que solo obtuvimos ruido. Se estudiaron las conexiones de la antena y finalmente se detectó que el Bias no estaba bien conectado con el chip, por lo que se tuvieron que soldar.

Nos queda volver a montar todo el sistema y probar si hemos solucionado el problema. Debido a las dificultades que presenta el alineamiento del láser que además, obliga a situar la antena en el camino del haz, se prevé montar un sistema de acoplo de la luz en fibra.

## 5. Conclusiones

En este proyecto se ha llevado a cabo una revisión del estado de la técnica de los Terahercios. Hemos visto el motivo por el cual se llama “GAP” a esta banda del espectro, así como los problemas para tapar este agujero ya sea des del campo eléctrico o óptico. Existen tres grandes estrategias para abordar el problema del GAP; QCL, Rectificación Óptica y fotoconductividad, nosotros nos hemos centrado en la fotoconductividad.

Repasamos las aplicaciones y mostramos el interés que hay para seguir investigando en este campo.

Se han estudiado y descrito dos de los sistemas comerciales de Terahercios; Time-Domain y Frequency-Domain. Estos equipos hacía mucho tiempo que no se utilizaban, nos encontramos con los dos sistemas sin funcionar y sin mucha ayuda más allá de la que nos podía ofrecer el fabricante por correo electrónico. Hay que destacar que estos dos sistemas ya están descatalogados. Con respecto a los actuales existe una ventaja de cara al investigador, se puede acceder a casi todos los elementos de forma directa. En cambio los sistemas nuevos son del tipo “cajas negras” donde pocos elementos se pueden ajustar por no decir ninguno. Por el contrario, hay más problemas de ajuste, alineamiento y en general hay que tener muchos más conocimientos para manipularlos.

Hemos visto los parámetros más característicos de cada uno, sus ventajas e inconvenientes y cuando es más óptimo utilizar un sistema en concreto.

Se ha identificado que existen problemas en los dos equipos y se ha realizado una búsqueda de posibles soluciones para ponerlos de nuevo en marcha.

En el caso del sistema de onda continua, se ha visto que había un mal alineamiento en el FiberDock del láser, se ha corregido para que los dos láseres inyecten la misma potencia óptica. Otro problema que nos encontramos es con el mal estado de las conexiones de las fibras, sobre todo en la salida 2 del divisor, en el centro del núcleo se podía ver un cráter, coincidía con la salida de menor potencia. Se buscaron varias estrategias para el pulido hasta que se consiguió dejarlo en muy buen estado. Posteriormente se obtuvieron los resultados esperados en las dos salidas del divisor y se aumentó mucho los valores de la fotocorriente de las antenas y por consecuencia el valor de Terahercios recibido en una transmisión. Desgraciadamente seguíamos sin tener los resultados óptimos de la fotocorriente en las antenas. Se buscaron posibles errores para este problema, como comprobar la polarización, cambiar tramos de fibra sin conseguir avances. Hasta donde hemos llegado podemos decir que el problema está en las antenas o incluso en el tramo de fibra (fijo). Comprobamos el buen estado del Bias, a la antena le llegaba la frecuencia y amplitud que le correspondía en todo

momento. Nos da la sensación que no se está generando correctamente la fotocorriente.

En el sistema temporal se tuvo que recalibrar todos los espejos y lentes del sistema, se obtuvo alguna medida pero pocos días después el sistema dejó de funcionar. Como el Gap tiene una medida muy pequeña  $5\mu\text{m}$ , nos costó mucho alinear todo el sistema. Al ver que simplemente teníamos ruido decidimos desmontar todo para comprobar las antenas directamente. Se observó que no respondían a una luz láser incidente, finalmente se observó que se había dañado la conexión del Bias con el chip de la antena. Se reparó satisfactoriamente. Por falta de tiempo no se pudo montar y repetir las mediciones.

Se redacta un conjunto de guías para detectar y solucionar los problemas que nos hemos encontrado así como una ayuda para manipular los sistemas.

## 6. Bibliografia

- [1] Shian U. Hwu<sup>1</sup>, Kanishka B. deSilva<sup>2</sup>, Cindy T. Jih<sup>3</sup> “Terahertz (THz) Wireless Systems for Space Applications”, <sup>1</sup>Barrios Technology, <sup>2</sup>Jacobs Technology, <sup>3</sup>NASA Johnson Space Center
- [2] X.-C. Zhang, Jingzhou Xu “Introduction to THz Wave Photonics”, 2010
- [3] Yun-Shik Lee, “Principles of Terahertz Science and Technology”, Physics Department Oregon State University, 2009
- [4] Diapositivas Curso “Terahertz Technology and Applications”, Mayo-Junio 2018, UPC, Barcelona España
- [5] Manual “CW Terahertz Spectroscopy Kit”, Toptica Photonics AG, 2011
- [6] Paper “Acceptance Report cw Terahertz”, Toptica Photonics AG, 2009
- [7] Paper “Production and Quality Control Data Sheet DL 100 DFB-L\_1276”, Toptica Photonics AG, 2009
- [8] Paper “Production and Quality Control Data Sheet DL 100 DFB-L\_1277”, Toptica Photonics AG, 2009
- [9] Paper “Handling of Photomixers”, Toptica Photonics AG
- [10] Manual “Photo Diode Amplifier, PDA 100”, Toptica Photonics AG, 2010
- [11] Manual “Distributed Feedback Diode Laser Head, DL-DFB”, Toptica Photonics AG, 2010
- [12] Manual “Compact Fiber Coupler, FiberDock”, Toptica Photonics AG, 2007
- [13] <http://www.flukenetworks.com/knowledge-base/certifiber-pro/cleaning-fiber-endfaces>
- [14] <https://www.toptica.com/products/terahertz-systems/frequency-domain/gaas-and-ingaas-photomixers/>

## 7. Anexos

### Procedimiento para la medida de la fotocorriente

Primero de todo, debemos tener dos elementos esenciales; el multímetro o amperímetro con un rango de microamperios y nuestro Breakout Box.

El Breakout Box tiene dos conectores hembra BNC y dos conectores banana. Lo conectaremos entre el cable SMB-BNC de la salida del Bias (mod out) y el fotomixer que vamos a testear (TX o RX). Finalmente, solo tenemos que conectar el amperímetro al Breakout Box con el conector banana.

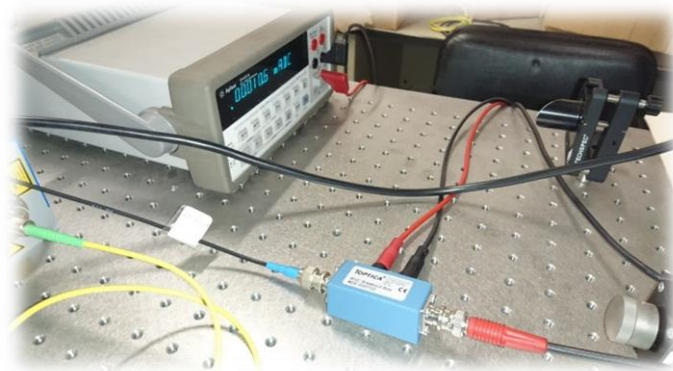


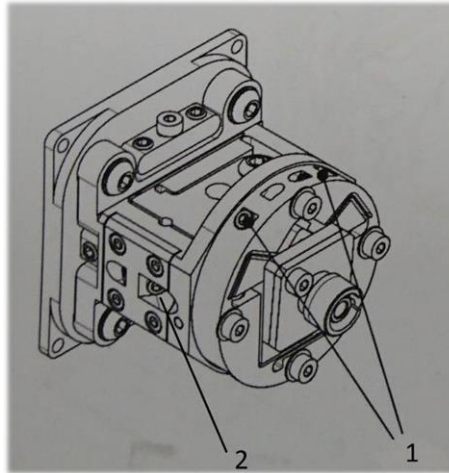
Fig. 4 La parte izquierda del Breakout Box conectaremos la salida del Bias (mod out), en la parte derecha vemos el cable con conector BNC que va hacia la antena. El conector banana lo conectamos al amperímetro

Para medir la fotocorriente de la antena aplicaremos solamente un offset en continua, es decir la amplitud del Bias deberá de estar a cero. Iremos cambiando el valor del Bias al mismo tiempo que vamos obteniendo la lectura en nuestro amperímetro.

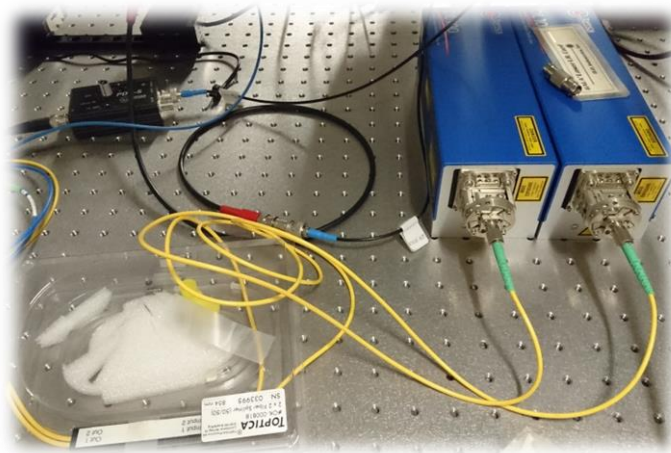
#### Procedimiento de medida:

- 1- Conectar ópticamente el fotomixer que vamos a realizar la medida, no conectarlo eléctricamente.
- 2- Encender el software TOPAS cw TeraHertz Control.
- 3- Encender los láseres.
- 4- Conectar el cable SMB-BNC de la salida mod out que encontramos en la parte frontal del panel del Teracontrol hacia el conector BNC del Breakout Box (asegurarse de que tenga una Buena toma de tierra antes de hacer la conexión.)
- 5- Conectar el amperímetro hacia el Breakout Box , encender el amperímetro.
- 6- Conectar el PCA por la conexión BNC que nos queda libre del Breakout Box.
- 7- Ajustar el Offset del Bias des de -11 a 11v para la antena TX o de -2 a 2v para la Rx. (La amplitud siempre a cero).

## Procedimiento para ajustar el FiberDock



- 1) Conectar la fibra en el FiberDock y por el otro extremo hacia el medidor de potencia.  
Encender el láser.
  - a. Utilizaremos los tornillos de alineamiento del FiberDock del eje X y Y (1) hasta conseguir la máxima potencia.
  - b. Girar el desplazamiento en el eje Z de la lente hasta encontrar un máximo de potencia.
  - c. Repetir a y b recursivamente hasta maximizar la potencia.



## Realizar medidas con el Sistema CW

Para manipular el sistema de onda continua se debe de tomar una serie de precauciones. Muy importante es el uso de una pulsera antiestática si necesitamos tocar algún componente, sobre todo las antenas. Una descarga de nuestro cuerpo produciría una corriente muy elevada para este tipo de fotoconductor.

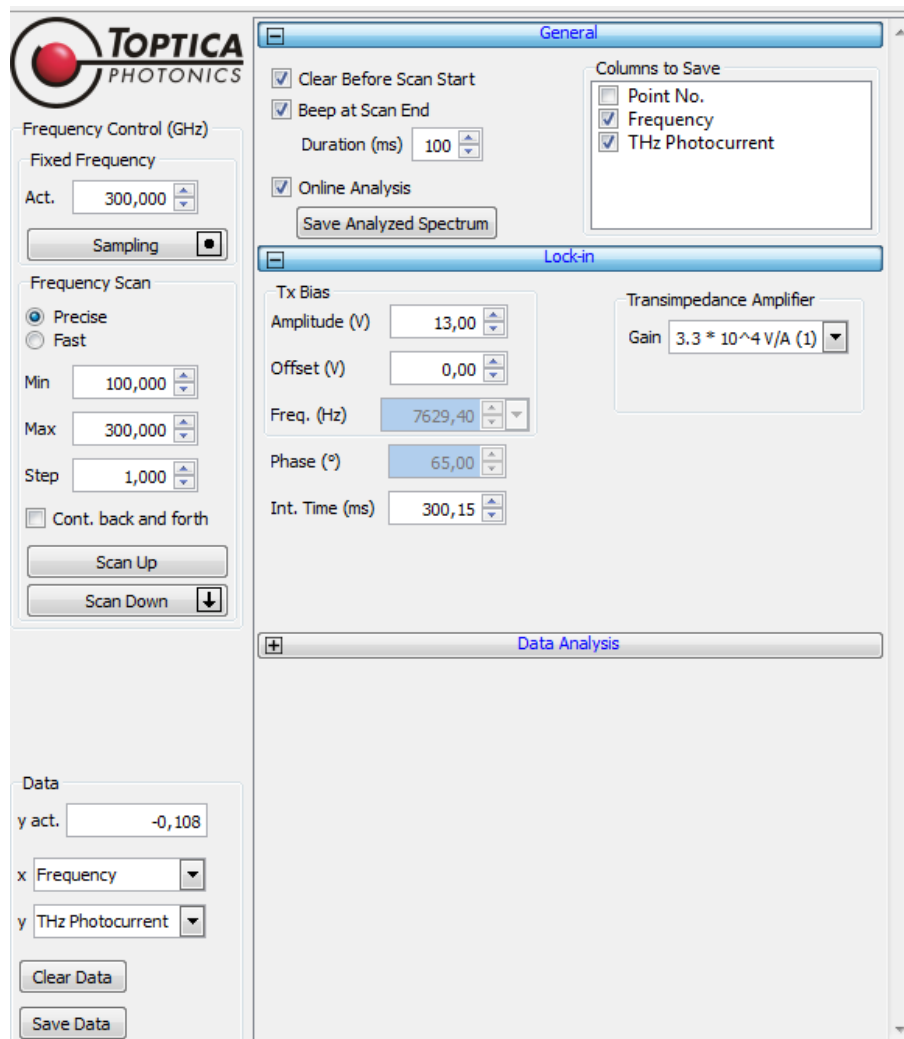
Se recomienda mantener las antenas cruzadas electrónicamente si no las vamos a usar durante un periodo largo. Por experiencia en este trabajo, recomiendo siempre limpiar los conectores de las fibras antes de conectarlos, mirar con el microscopio su estado ya que muchas veces puede quedar algún resto del papel o materia no deseada. Siempre guardarlos con su protector.

A continuación se explican los pasos para el encendido y la toma de mediciones del sistema.

- 1- Conectar ópticamente las antenas, no conectarlas eléctricamente.
- 2- Encender el software TOPAS cw TeraHertz Control software.
- 3- Encender el módulo TeraControl girando la llave hacia el ON.
- 4- Apretar el botón de ON para encender el láser.
- 5- Conectaremos al frontal del TeraControl los conectores SMB Sign. In y mod out (están etiquetados).
- 6- Seguidamente conectaremos la alimentación del PDA y revisaremos que la salida sea el cable etiquetado como Sign.In, la entrada proviene de la salida eléctrica de la antena receptora. La antena transmisora, la parte eléctrica va conectado con el cable etiquetado como mod.out.

Ahora ya estamos preparados para poder hacer las medidas. En la siguiente imagen se muestra una captura del software con sus parámetros.

Si queremos hacer una medida a una determinada frecuencia debemos de introducir la frecuencia en el cuadro "Fixed Frequency" Act. y seleccionar el botón "sampling". Veremos que en la parte izquierda de la pantalla se muestra la fotocorriente por número de muestras y la envolvente que en este caso sería una raya vertical en la frecuencia ajustada. Si deseamos un barrido, introduciremos los datos en la casilla inferior; frecuencia mínima, frecuencia máxima y el salto deseado. Depende del salto tendremos más o menos muestras.



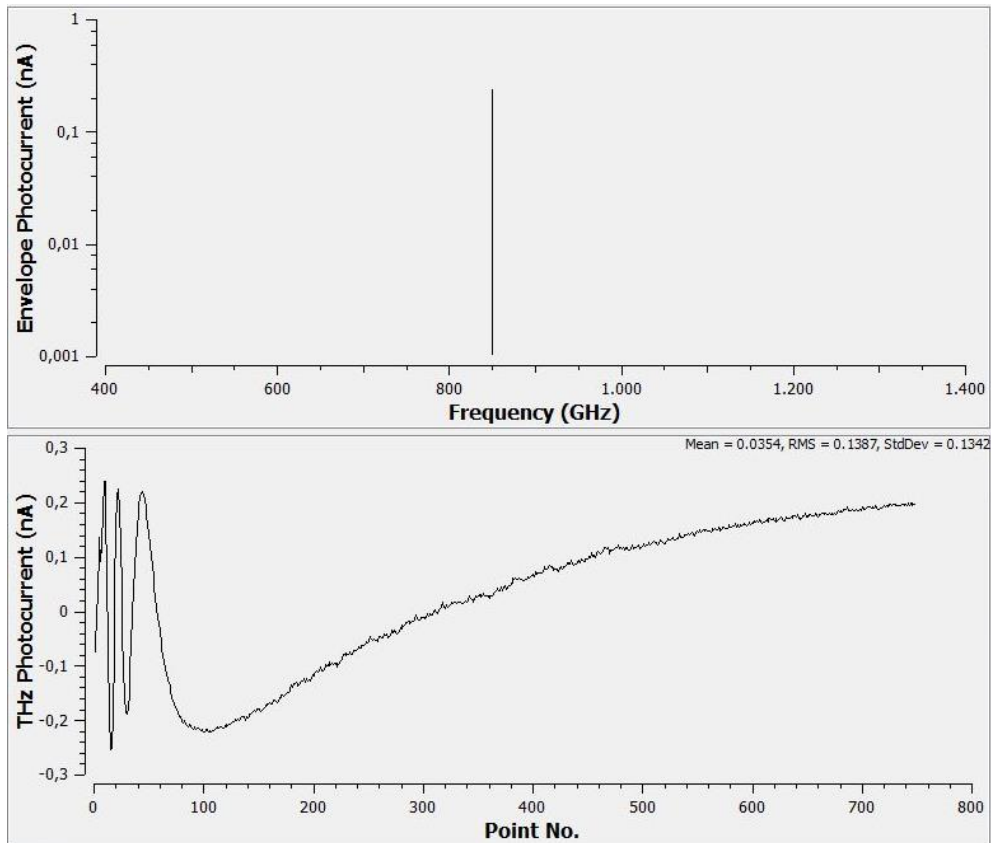
La sección del Lock-in es importante. La amplitud del Bias la ajustaremos a 13V, el Offset siempre a 0v (a no ser que queramos medir la fotocorriente, ver anexo). El amplificador de transimpedancia debe coincidir con la selección del PDA, en la imagen vemos que tenemos seleccionado el primer nivel, en el PDA debería de estar en la primera posición de la escala, si no lo hacemos así los valores serán incorrectos.

El tiempo de integración si queremos obtener una buena representación lo dejaremos en 300.15ms, si queremos ver rápido el resultado lo bajaremos a 30ms.

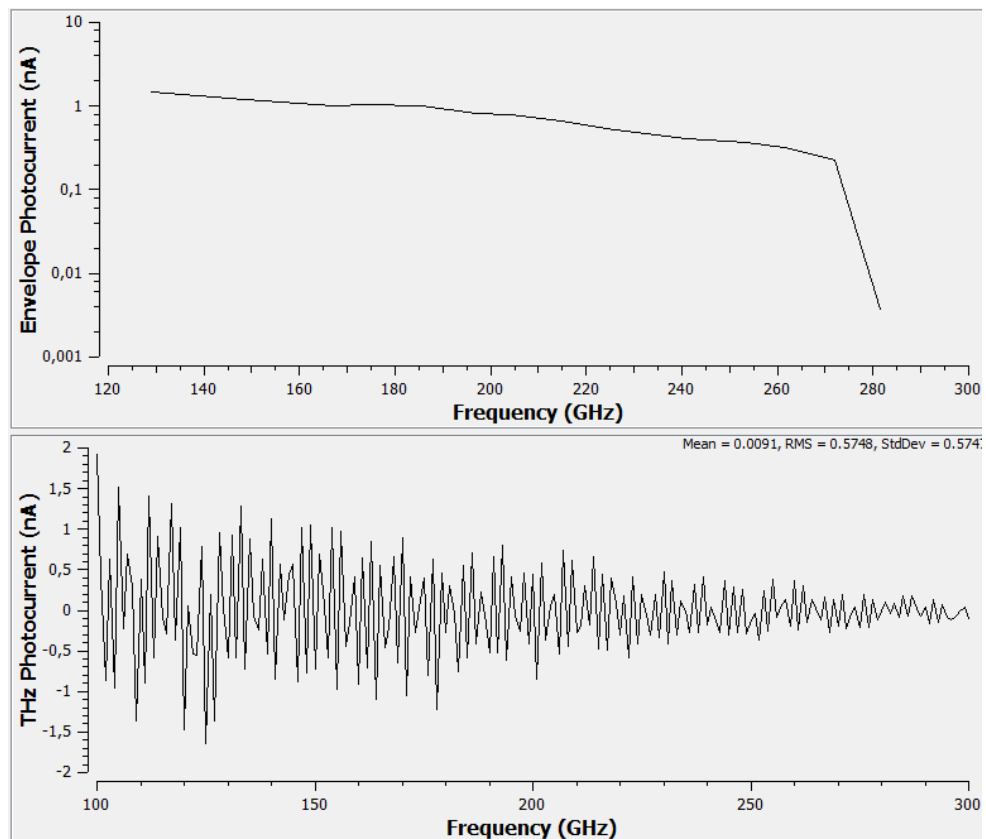
Por lo que hemos visto hay varias variables que van a afectar al tiempo total de la medida. Si hacemos un barrido, tenemos una frecuencia mínima y una máxima que nos dará una serie de puntos según sea el salto establecido. Por otro lado, también tendremos el tiempo de integración.

Si queremos una medida rápida, para tener una idea de que nos enfrentamos, seleccionaremos saltos grandes y con un tiempo de integración bajo. Una vez localizada la zona del espectro a estudiar, entonces aplicaremos otros parámetros para tener una buena representación.





Medida fija a 850GHz con tiempo de integración 300.15ms y ganancia 4



Barrido de 100 a 300GHz con tiempo de integración 300.15ms y ganancia 1

## Rutina Matlab Time-Domain

A continuación se muestra el funcionamiento mediante código Matlab del sistema Time-Domain. También se explica cómo se llevó a cabo la calibración.

En la ruta siguiente encontraremos el código de Matlab con el nombre “test\_new”;  
C:\Users\TeraK15Kit\Documents\MATLAB\Terahertz\Routines\

```
addpath('C:\Users\TeraK15Kit\Documents\MATLAB\Terahertz\Routines\');
initialize_XY
initialize_THz('integrationTime', 3e-3);
% initialize_THz('useSpeaker',true)
% initialize_humidity
% initialize_power
homeXY('axis','x');
homeXY('axis','y');
%moveY(20);
startpos=58;
stoppos=61;
%% Precise (slow) measurement
global reporting
reporting=true;
[t,p,x]=fineMeasurement(startpos,stoppos,0.005);
plot(x,p)
%% Quick measurement
[t_aux2,p_aux2,x_aux2]=fastMeasurement(startpos,stoppos,0.005,1.5);
figure;
hold on;
plot(x_aux2,p_aux2,'b')
%% Speaker
initialize_THz('useSpeaker',true)
[t,d]=speakerMeasurement();
% [t,d]=speakerMeasurement(59);
%% Position THz Stage
movTHzStageDistance(59);
```

Una vez ejecutado el archivo, podremos mover el motor para situar la muestra justo en el medio de la estructura. El motor es del tipo paso a paso, es decir se le envían unos impulsos eléctricos y este lo convierte en movimiento.

En nuestro caso le enviamos las siguientes instrucciones para situar la muestra justo en medio de la estructura;

```
moveY(40)
moveY(38)
moveY(30)
moveY(20)
moveY(0)
moveX(80)
moveX(60)
moveX(40)
moveX(10)
moveX(0)
```

Cuando tenemos la estructura bien situada y hemos sujetado la muestra a medir podemos continuar con la medida de una muestra en una posición determinada siguiendo estos pasos;

```
movTHzStageDistance(posInMillimeters)
getsampleDAQ
```

Con ello nos dará el valor numérico en el terminal, si deseamos hacer un barrido y representarlo gráficamente podemos seguir los siguientes pasos:

```
[t,p,x]=fineMeasurement(startpos,stoppos,0.005);
figure(1)
plot(x,p)
```

Para calibrar el sistema primero hicimos un barrido para detectar el pico máximo y luego nos fijamos en ese punto para maximizarlo. Para hacer el calibrado de una forma más cómoda se realizó un bucle.

```
movTHzStageDistance(59.03)
getsampleDAQ
while 1, getsampleDAQ, pause (0.1), end
```

Debemos ir con mucho cuidado con el movimiento del motor ya que la estructura que sujeta la muestra puede colisionar un soporte. Siempre que sea posible utilizaremos el comando “fineMeasurement” ya que obtendremos mejores resultados que fijando una velocidad con el “fastMeasurement”.

## Resultados de la primera medida de la fotocorriente

### TX Antenna WA36R

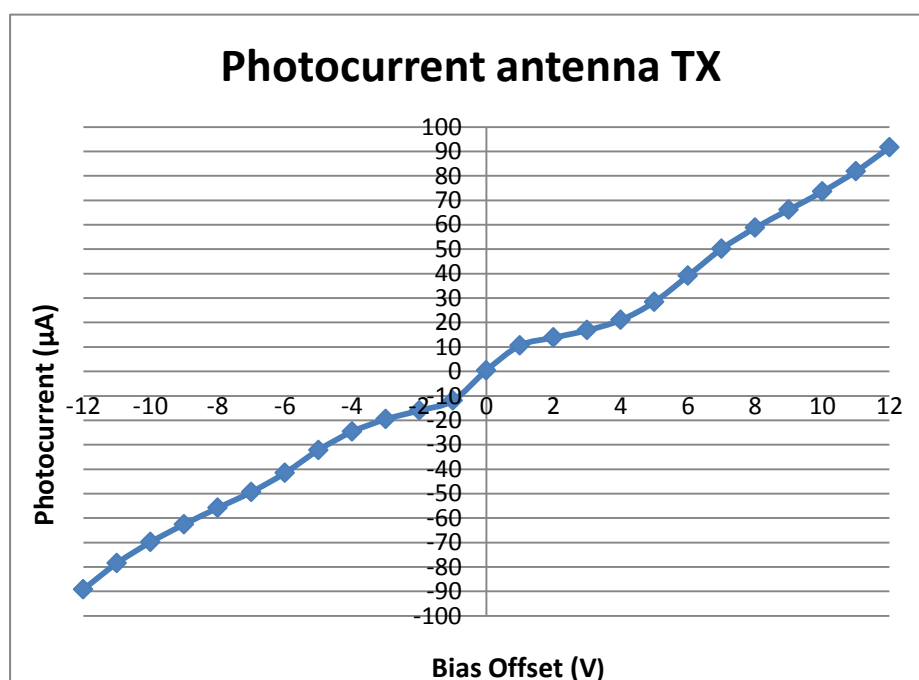
Bias Offset (V)	Photocurrent ( $\mu\text{A}$ )
-11	-78,5
-10	-69,9
-9	-62,6
-8	-55,9
-7	-49,4
-6	-41,6
-5	-32,2
-4	-24,7
-3	-19,6
-2	-16
-1	-12
0	0,4
1	10,6
2	13,8
3	16,8
4	21
5	28,4
6	39,1
7	50,1
8	58,7
9	66,1
10	73,5
11	81,8

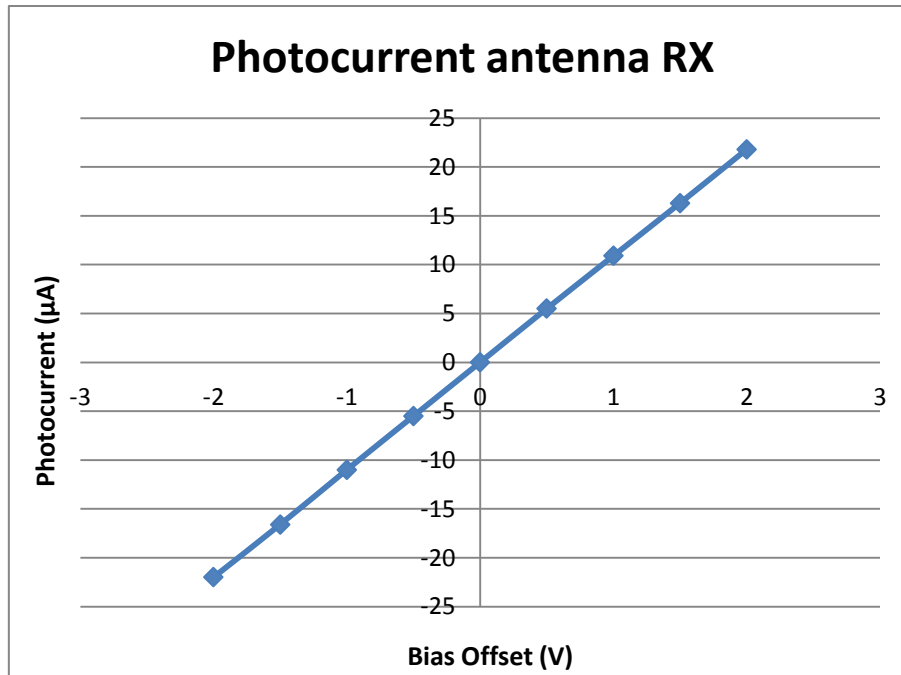
Tabla 1

### RX Antenna RX006R

Bias Offset (V)	Photocurrent ( $\mu\text{A}$ )
-2	-22
-1,5	-16,6
-1	-11
-0,5	-5,5
0	0
0,5	5,5
1	10,9
1,5	16,3
2	21,8

Tabla 2





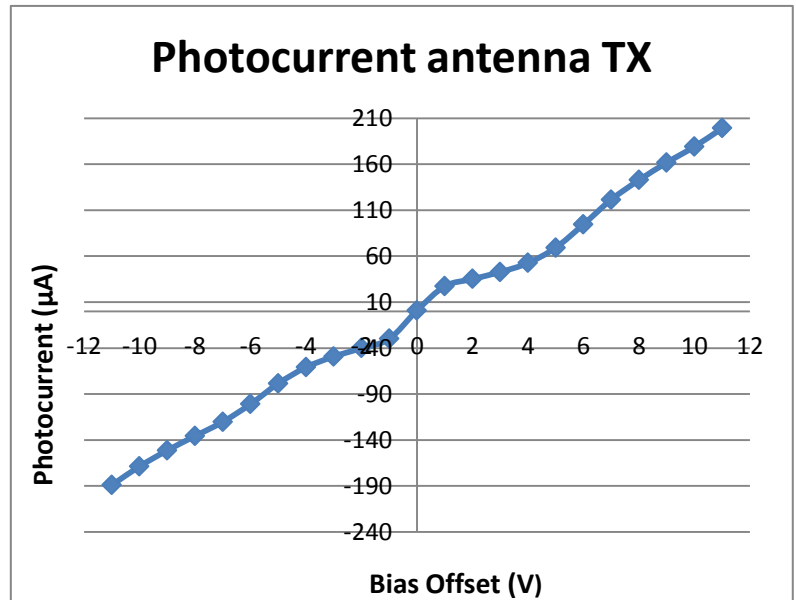
La tabla 1 corresponde a la antena de transmisión y la tabla 2 es para la antena de recepción. Darse cuenta de los diferentes márgenes del Offset que se han aplicado para las dos antenas, TX y RX.

# Medida de la fotocorriente después de la limpieza de conectores

## OUT 1 of Splitter:

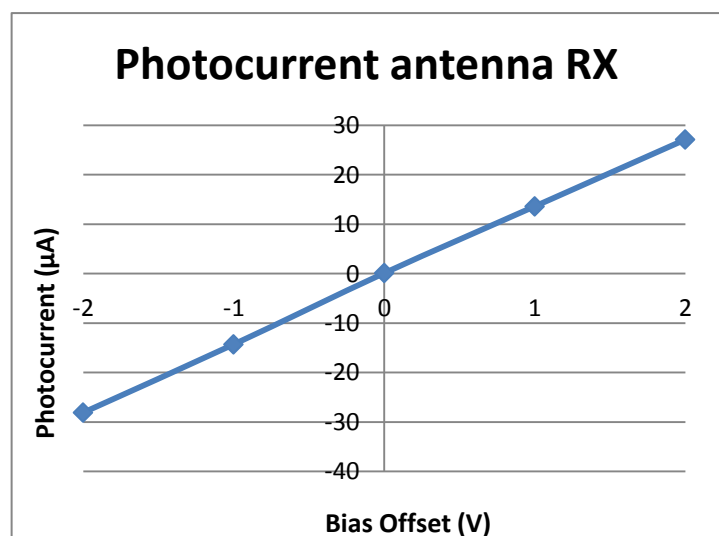
### TX

Bias Offset (V)	Photocurrent ( $\mu\text{A}$ )
-11	-189,1
-10	-168,7
-9	-151,3
-8	-135,7
-7	-120,3
-6	-101
-5	-78,5
-4	-60,9
-3	-49,2
-2	-40,1
-1	-30
0	0,9
1	27,2
2	35,1
3	42,7
4	52,5
5	69,2
6	94,5
7	121,4
8	142,7
9	161,7
10	179,1
11	199,1



### RX

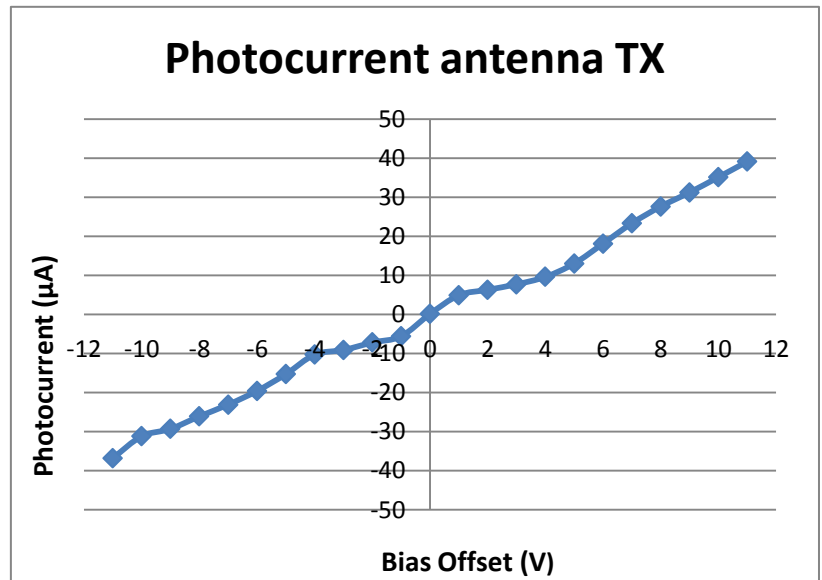
Bias Offset (V)	Photocurrent ( $\mu\text{A}$ )
-2	-28,1
-1	-14,3
0	0,1
1	13,6
2	27,1



OUT 2 of Splitter:

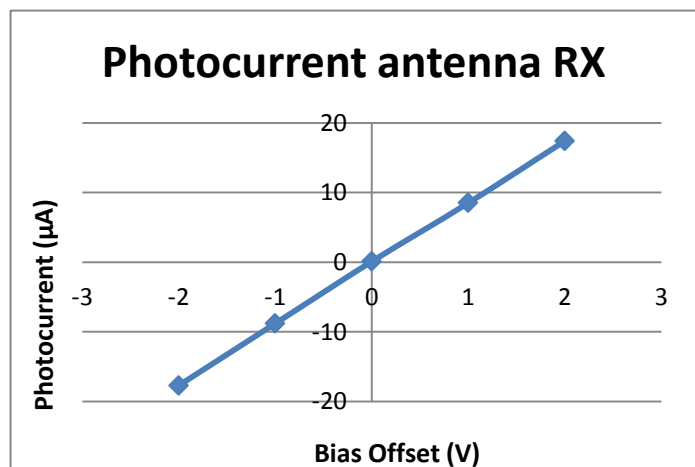
TX

Bias Offset (V)	Photocurrent ( $\mu\text{A}$ )
-11	-36,8
-10	-31,2
-9	-29,3
-8	-26,1
-7	-23,1
-6	-19,6
-5	-15,3
-4	-10,3
-3	-9,1
-2	-7,2
-1	-5,6
0	0,1
1	4,9
2	6,3
3	7,7
4	9,6
5	13
6	18,1
7	23,3
8	27,6
9	31,2
10	35,1
11	39,1



RX

Bias Offset (V)	Photocurrent ( $\mu\text{A}$ )
-2	-17,7
-1	-8,8
0	0,1
1	8,5
2	17,4



Observamos una mejora después de la limpieza, pero no obtenemos los valores deseados.

## Comprobación de la polarización:

Para comprobar la polarización necesitaremos un polarizador óptico. En primer lugar, insertaremos el polarizador entre el láser y el medidor de potencia óptica, seguidamente podremos rotar el anillo hasta que observemos un máximo en el medidor óptico.

En nuestro caso notamos que los dos láseres son de polarización vertical.

¿Qué pasa si hacemos la misma prueba pero en la salida del divisor?

Repetimos el procedimiento pero en la salida del divisor y obtenemos el máximo a  $345^\circ$  en la Salida 1 y a  $130^\circ$  en la Salida 2. Hay una diferencia de  $215^\circ$ .

Si el divisor está en buen estado no debe modificar la polarización. Tenemos un problema en el divisor o en alguna conexión de fibra que produce este efecto.

A continuación, vamos a hacer algunas pruebas con algunos tramos de fibra.

1) Laser + fibra APC-UPC (SMF standard):

P1= 70mW @ 853.4nm

P2= 38mW @ 855.5nm

Nota: Medidas tomadas con el medidor óptico aéreo.

2) Alineamiento con fibra SMF-Standard APC

Salida del divisor

Salida 1: 6mW

Salida 2: 4mW

Con los resultados obtenidos creemos que el divisor no usa una fibra estándar SMF. Repetimos las pruebas con una fibra tipo PM pero tampoco llegamos a ver diferencia.

En conclusión, en una de las salidas del divisor obtenemos una baja potencia. El sistema no es estable, podemos medir un valor y luego con las mismas conexiones podemos obtener un resultado diferente.

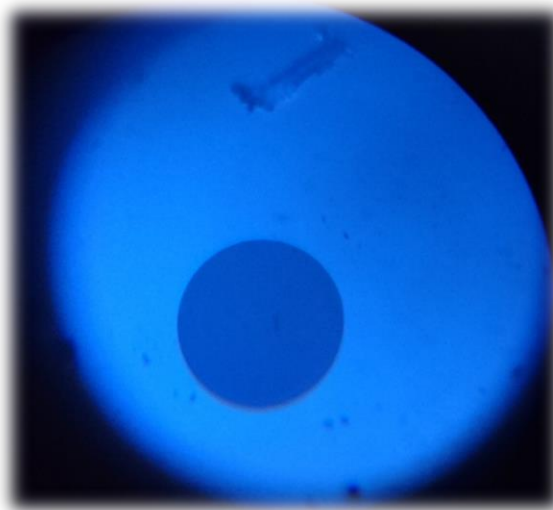


## Comprobación de los conectores:

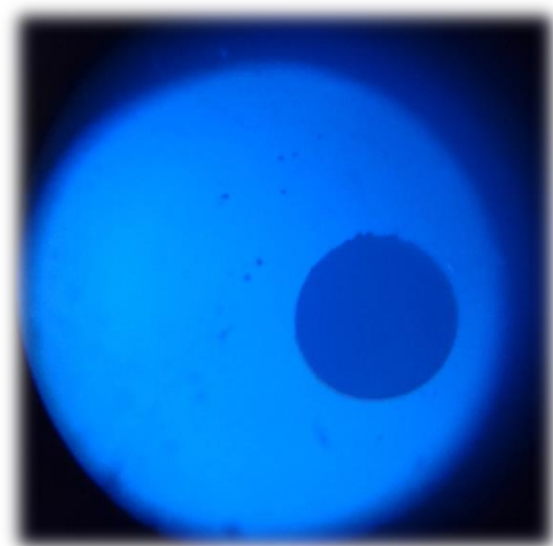
Todo parece indicar que hay varias conexiones en malas condiciones, se observan núcleos dañados en diferentes grados. A continuación se adjuntan unas fotografías que se hicieron acoplando la cámara de un dispositivo móvil al microscopio de mano, JDSU fm-c400 .

Las fotografías no son de gran calidad pero nos dan una idea del estado en que se encuentran los conectores de las fibras de nuestro sistema de Terahercios en el dominio de la frecuencia.

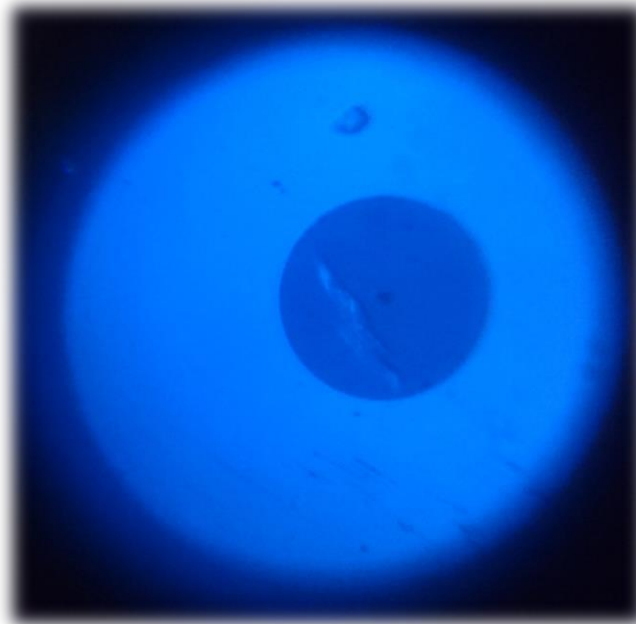
Entrada 1 del divisor



Entrada 2 del divisor



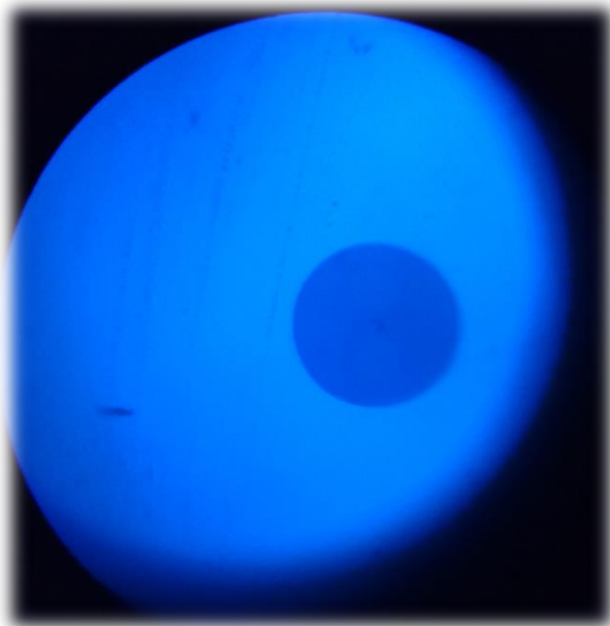
Salida 1 del divisor



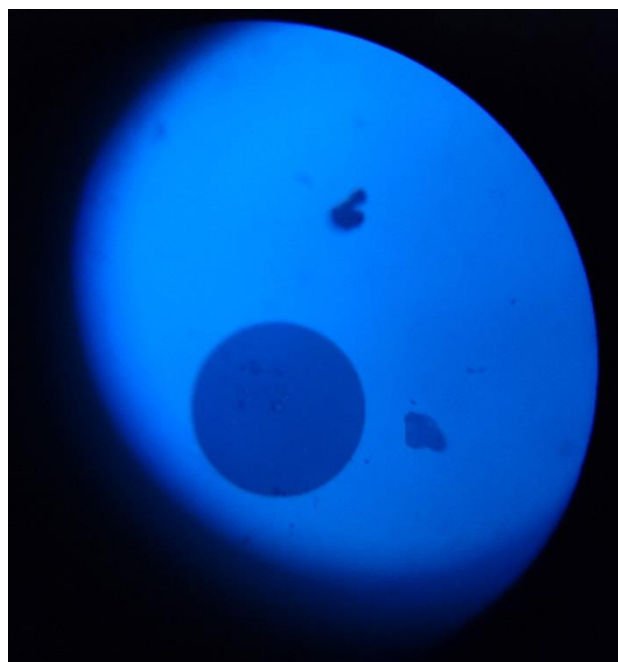
Salida 2 del divisor



Antena Rx



Antena TX





Conector antena TX



Entrada 2 del acoplador

## Experiencias con el pulido:

El estado de la salida 2 del acoplador puede ser un problema para transferir la potencia a la entrada del fotoconductor. Parece que se ha quemado, manejando potencias tan elevadas como del orden de centenares de milivatios si los conectores no están limpios pueden ocurrir estas deformaciones.

Buscamos información sobre cómo podemos pulir el núcleo de la fibra y nos encontramos con algunos kits para este propósito.

Por ejemplo, podríamos utilizar los kits de pulido de fibra de Thorlabs.

[https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=1350](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1350)

Hay muchos productos para realizar esta tarea; existen diferentes hojas de pulido para utilizar con ferrules de cerámica o acero inoxidable, diferentes discos de pulido para todos los tipos de conectores y muchos accesorios. En el mercado podemos encontrar unos kits de reparación que reúnen las herramientas necesarias para este propósito.

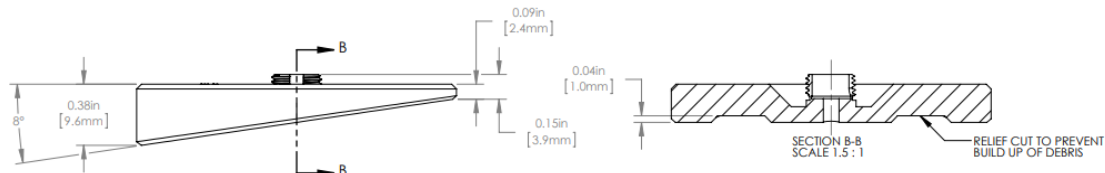
En nuestras fibras usamos los conectores del tipo FC / APC, por lo que necesitamos un conector del mismo tipo para el disco de pulido.

Thorlabs nos ofrece este disco;



D50-FC/APC - FC/APC, Disco pulidor

En la página web del fabricante nos encontramos que podemos descargar el proyecto en Auto CAD con más detalles. En principio la información que nos facilitan no es apta para su fabricación, es sólo para información. Sin embargo, podríamos construir un dispositivo similar para realizar el pulido, para ello necesitamos la ayuda y la opinión de nuestro compañero del taller mecánico.



Adjunto: D50-FC\_APC-AutoCADPDF.pdf

Hablamos con el mecánico para saber si se puede construir un disco a partir de la documentación que tenemos.

El disco debe construirse con un material que no deje rastros, no queremos rayar la parte de la superficie del conector.

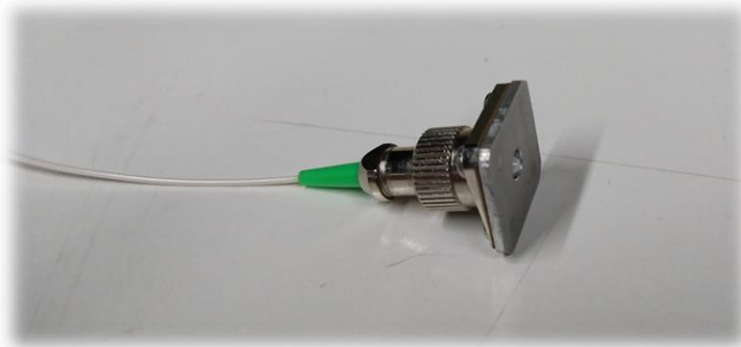
Además, necesitamos cierta precisión para obtener ocho grados (conector APC) y no sabemos si lo podríamos conseguir.

En nuestro departamento encontramos un disco FC / UPC. El siguiente paso sería encontrar un conector de fibra FC / UPC en un estado similar al que queremos arreglar, para verificar si podremos repararlo, antes de comprar o construir un disco de pulido.

Desafortunadamente, el disco de pulido no se adapta al tipo de nuestro conector FC / UPC, es para conectores ST / BFOC que tiene un ferrule más largo. Además, necesitamos las diferentes hojas de pulido que todavía no tenemos.

Se ha pedido a nuestro mecánico la fabricación del disco, para ello se ha utilizado un adaptador APC hembra-hembra dividido en dos partes. Una parte la hemos descartado, la otra la utilizaremos para adherirla a un material suficientemente grueso como para poder dar una inclinación de ocho grados.

El material de esta pieza es muy importante, debe ser un material duro, no debe dejar virutas, polvo o cualquier rastro del material cuando estemos puliendo.



Finalmente hemos podido conseguir papel de pulido para conectores de fibra, disponemos de diferentes granos para profundidades de  $30\ \mu\text{m}$ ,  $9\ \mu\text{m}$ ,  $6\ \mu\text{m}$  y  $1\ \mu\text{m}$ .

Primero usamos el más grande  $30\ \mu\text{m}$ , luego continuamos con  $9\ \mu\text{m}$  y terminaremos con el más pequeño,  $1\ \mu\text{m}$ . Esperemos que la base de nuestro “disco” pulidor sea lo suficientemente resistente.

Ahora que ya tenemos todo preparado para hacer el pulido haremos algunas mediciones antes para poderlas comparar con los resultados posteriores. Para hacer esto necesitamos un láser y un multímetro óptico, debemos conocer la potencia de salida real del láser o también nos vale calcular la diferencia entre las mediciones.

En nuestro laboratorio tenemos un láser sintonizado concretamente el Telecom-Test Laser modelo 6427. La salida óptica es del tipo FC / APC, además podemos variar la longitud de onda y la potencia de salida.



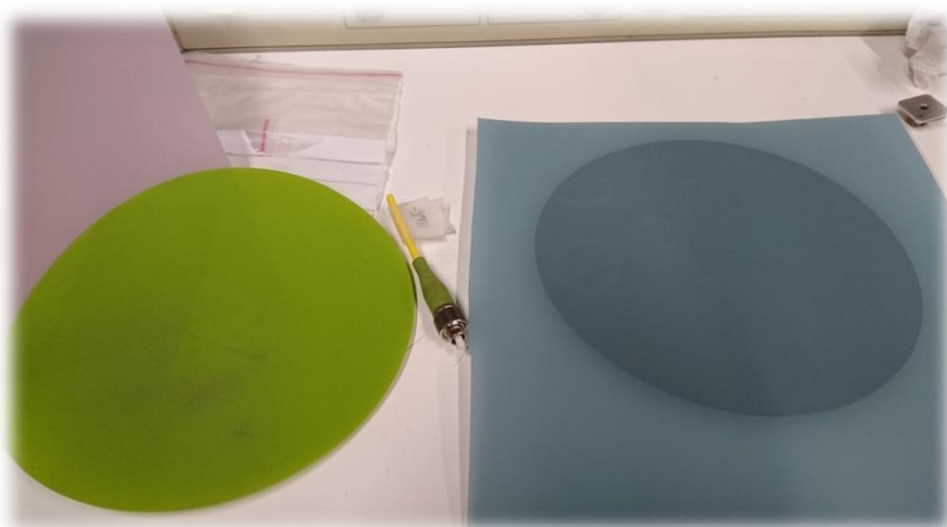
Este láser con el multímetro óptico que utilizamos en pruebas anteriores, HP 8153A, es el equipo perfecto para probar nuestro pulidor.

Antes de hacer las mediciones revisamos las conexiones de fibra. La salida del láser usa el tipo APC y la entrada del multímetro óptico el tipo UPC, es decir como nuestra fibra para pulir es APC / APC deberemos de adaptar la entrada UPC del multímetro a APC. Una vez adaptado, ya podremos conectar la fibra entre el láser y la fibra adaptadora APC/UPC.

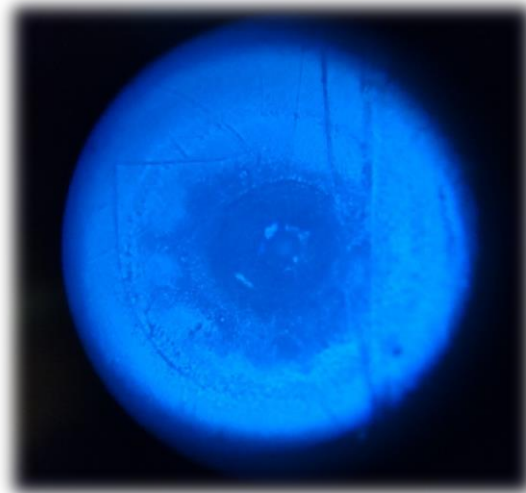
Una parte muy importante de estas medidas es realizarlas con las mismas condiciones de trabajo, es decir, usar las mismas conexiones de fibra y la misma longitud de onda y potencia para obtener unos resultados fiables.

### **Primer pulido:**

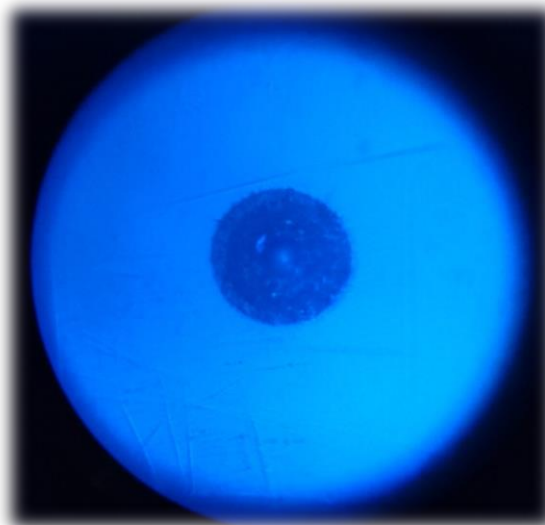
Antes de usar nuestras fibras del sistema de dominio de frecuencia de Terahercios utilizaremos un conector en mal estado. Como no sabemos si nuestro disco funcionará bien, por lo tanto, lo comprobaremos con un conector de fibra que ya no tenga uso.



En primer lugar, tomamos una foto antes de pulir, podemos ver fácilmente el mal estado del núcleo de fibra, incluso peor comparando con la salida 2 del divisor.



Tratamos de pulir y limpiar con nuestro disco y papel. Comenzamos a usar el más grueso, 30  $\mu\text{m}$ , durante mucho tiempo y terminaremos con el menos granulado para obtener el mejor pulido.



La imagen de arriba fue capturada después de pulir el conector, vemos que ha mejorado bastante. Pulimos las partes más gruesas que estaban dañadas y estamos satisfechos con estos resultados. Obviamente, el estado actual del conector no es bueno, podemos ver muchos arañazos y el núcleo de la fibra no está bien pulido. De todos modos parece que el pulidor hecho a mano es efectivo.

También debemos de tener en cuenta que el conector estaba en muy mal estado, inicialmente se clasificó para ser reciclado.



Nuestros conectores están bastante mejor que el conector de prueba, por lo que deberíamos pulirlos sin problemas.

Ahora nos toca limpiar todos los conectores de fibra de nuestro divisor óptico. Disponemos de una fuente láser a 1550nm para hacer las mediciones.

El objetivo es pulir el conector e intentar que la superficie sea totalmente uniforme sin tener la deformación, cráter, en la parte central seguramente producido por la combinación de suciedad y manejo de alta potencia. Creemos que las pérdidas que tenemos vienen por no tener la superficie en buen estado, ya que el agujero es lo suficientemente profundo como para alterar la potencia óptica.

Para obtener un buen resultado en el pulido el conector será lijado por diferentes tipos de papel de lija para este uso. Tenemos diferentes grosores de grano; 30, 9 y 1  $\mu\text{m}$  y alguno más para hacer el último acabado.

Ajustamos nuestro láser a 1Dbm a la longitud de onda de 1550nm. Por otro lado tenemos el multímetro óptico, HP 8153<sup>a</sup>, que se encargará de hacer las mediciones.



Usamos estas conexiones;

Salida del láser → APC / APC (Panda) → Splitter (muestra)

→ APC / UPC (Panda) → Multímetro Óptico.

Primero, verificamos que no tengamos pérdidas en las fibras de conexión; una manera de hacerlo sería conectar todas las fibras sin el divisor y leer en el multímetro el mismo valor que emite la fuente con un margen de pérdida por las conexiones.

Laser OUT-APC / APC (Panda) → APC / UPC (Panda) → Lightwave

Probamos que obtengamos el valor esperado aproximadamente de 1dbm. Las pérdidas del conector se minimizan cuando los dos núcleos de fibra son idénticos y están perfectamente alineados. Otro factor importante es tener siempre los conectores o empalmes correctamente terminados y que no exista suciedad.

Teniendo en cuenta que tenemos dos adaptadores, podríamos perder algo de potencia óptica.

Los empalmes mecánicos suelen tener pérdidas más altas que generalmente oscilan entre 0,2 y alguna vez puede llegar a más de 1,0 dB. Los empalmes de fusión tienen menores pérdidas, usualmente menos de 0.1 dB.

Las pérdidas en los conectores de fibra óptica suelen oscilar entre 0,25 hasta 1,5 dB y dependen en gran medida del tipo de conector utilizado.

Altas pérdidas pueden atribuirse a una serie de factores;

- Instalación incorrecta del conector
- Desalineación de los núcleos de fibra
- Vacio de aire
- Suciedad o sustancias contaminantes en el conector (muy común)
- Índice de refracción desadaptado
- Desajuste del diámetro del núcleo

Después de comprobar que el estado de las otras fibras es bueno, haremos una medición de las dos salidas del divisor. Recordamos que la salida 2 es peor que la salida 1 y el multímetro óptico así nos lo muestra.

La salida 2 es de aproximadamente -60dBm y la salida 1 de -56dBm, perdemos mucha potencia. Cuando estamos haciendo la medición vemos que la potencia fluctúa si tocamos la fibra, un comportamiento algo sospechoso.

El siguiente paso es pulir los conectores de fibra con las diferentes lijas. Usaremos varios grosores de 30, 9 y 1  $\mu\text{m}$  en este orden.

Para obtener un mejor resultado debemos mover la base del polidor haciendo un dibujo en forma de ocho, así varias veces.

Nos detendremos cada pocos ciclos completos y observaremos el progreso con el microscopio de mano. Debemos de tener cuidado de no excedernos con el tiempo de pulido ya que podríamos disminuir la longitud de la férula demasiado. Si pulimos más de la cuenta podríamos tener pérdidas en la conexión o en el empalme.

En la fibra de prueba perdimos 1dB por lo que es muy importante hacerlo muy lento y con cuidado. Este dato nos indica que el conector de la fibra no tenía arreglo, para pulir bien necesitábamos pasar dicho límite, con lo que empezamos a tener pérdidas.

Nuestro objetivo es pulir hasta que desaparezca el cráter, esperemos que no tenga mucha profundidad. Empezaremos a pulir con el papel más grueso y acabaremos con el más fino. Si todo ha ido bien para darle un acabado óptimo le pasaremos un papel específico para dejarlo totalmente uniforme.



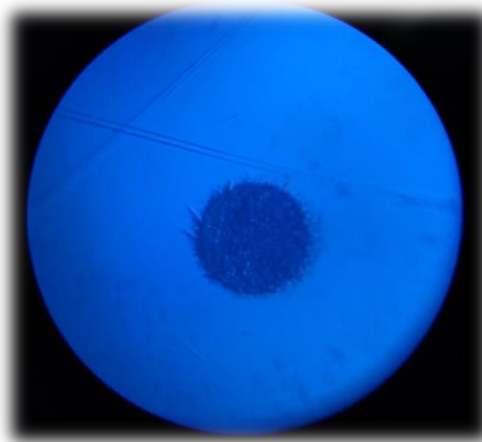
Hemos tenido algunos problemas con el pulidor y los papeles de lijado.

Mientras estábamos puliendo hemos observado que nuestro pulidor también se pulía y esto provocaba el esparcimiento de los restos hacía el papel y el propio conector de la fibra. Este efecto nos produce muchos arañazos, en vez de mejorar empeoramos la situación. Para resolver este problema hemos llegado a la conclusión que una solución sería construir un nuevo adaptador con material más duro.

Otro procedimiento menos recomendable sería utilizar agua destilada frecuentemente para limpiar el pulidor y los papeles de pulido. No es adecuado ya que la experiencia de hacerlo de esta manera nos dice que es contraproducente, estaríamos limpiando la mayor parte sin llegar a pulir ya que la base del material del pulidor se desprende fácilmente en pocos ciclos.

Pasos realizados:

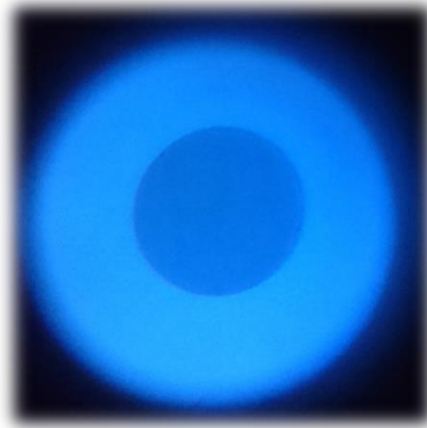
- 4- Pulidor grano de 30 o 9 micras
- 5- Pulidor grano 1 micra
- 6- Pulidor grano tipo DM (acabado)



Después de usar papel de 30µm



Después de usar papel de 1µm



Después de usar el papel DM

Después de pulir el conector repetimos las mediciones y obtuvimos mejores valores, aproximadamente  $-27\text{dBm}$ , por lo que ganamos unos 30 dB.

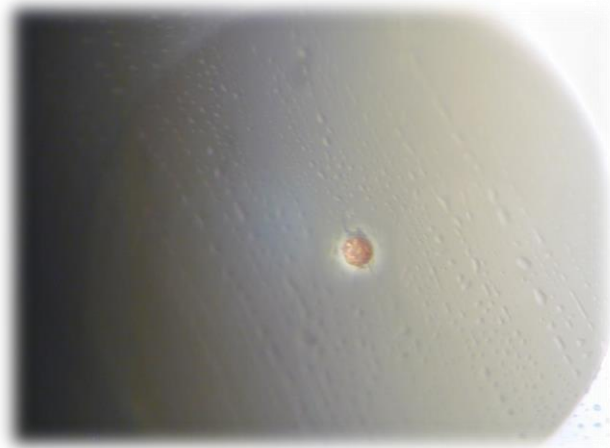
Sin embargo, el sistema es inestable, dependiendo como toquemos la fibra la potencia cambia el valor. En resumen, después de pulir los conectores, el cráter ha desaparecido y hemos ganado unos 30 dB.

Nos gustaría volver a tomar una fotografía con más resolución utilizando el equipo de medición de Nikon para compararlo con la imagen del conector antes de pulirlo.



Microscopio Nikon MM-11

El microscopio Nikon nos permite ver hasta cincuenta aumentos y podemos conectar una cámara fotográfica para tomar una fotografía con más resolución y detalle.



Salida 2 del divisor antes del pulido

En la imagen anterior se muestra el conector de fibra con la parte central del núcleo dañado. También observamos pequeñas gotas de agua, debido a que existe humedad en la zona donde se guarda el material. Esto no nos preocupa ya que se puede secar con un trapito para lentes o para uso de limpieza de fibras.



Salida 2 del divisor después del pulido

Después de pulir el conector de fibra el agujero central ha desaparecido por lo que ahora podemos afirmar que su profundidad no era superior a  $30\ \mu\text{m}$ , hemos tenido suerte.

Afortunadamente hemos conseguido pulir el cráter pero si observamos con más detalle detectamos algunos rasguños en el núcleo y la férula, debemos pulirlo mejor. Podríamos repetir la operación con un papel de pulido de fibra más fino.

Como mencioné antes tuvimos problemas con la base de nuestro pulidor. No pudimos continuar puliendo porque el adaptador de aluminio arañaba el material a pulir. Por otro lado también necesitábamos un papel de pulido más fino para un mejor acabado.

Buscamos el material que necesitábamos a nuestro proveedor Thorlabs para resolver este problema. Finalmente nos pudimos hacer con el disco de pulido FC / ACP y las hojas de pulido para acabados (0.02  $\mu\text{m}$ ).



Disco pulidor conector FC/APC-D50

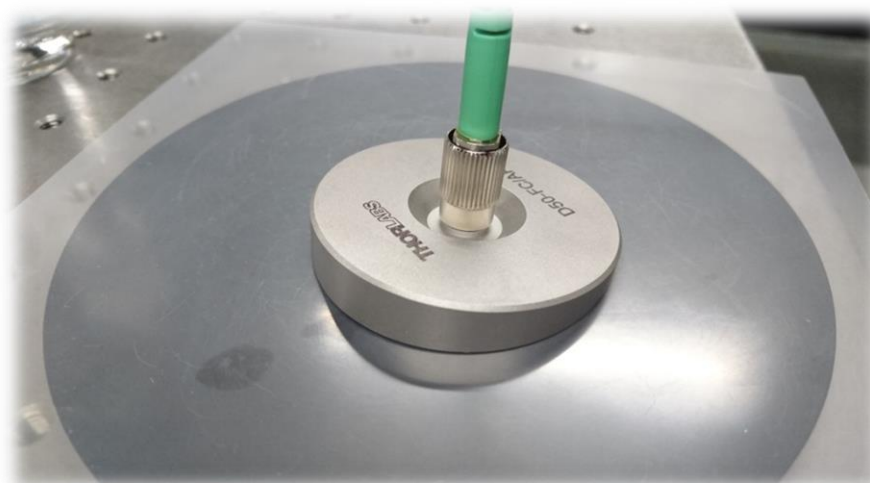


Hojas de pulido final (0.02  $\mu\text{m}$ )

Ahora tenemos las herramientas adecuadas para realizar un buen pulido, así que vamos a repetir los pasos con el disco D50 y nuestras hojas de pulido. Para acabar y obtener un buen resultado en el último paso usaremos la hoja de pulido final.

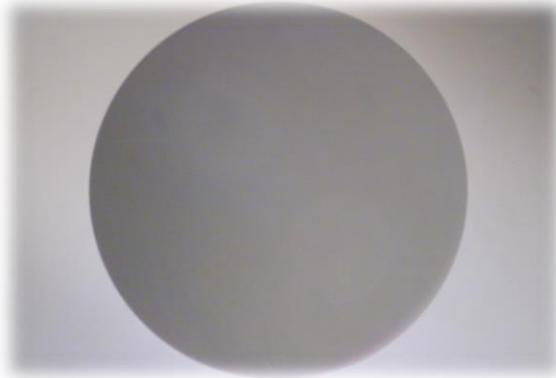
Nos hemos sorprendido mucho ya que hemos obtenido los mejores resultados vistos hasta ahora. El nuevo disco no interfiere con las hojas de pulido, a más más tenemos más control y precisión al ser de mayor tamaño.

Las últimas hojas de pulido que hemos usado tienen un grano de 0.02  $\mu\text{m}$ , los resultados son increíbles. Recomendamos usar esta hoja de pulido con la ayuda de un par de gotas de agua destilada, durante el pulido si vemos que necesitamos más iremos añadiendo



Conector de fibra con el disco D50 y la hoja de 0.02  $\mu\text{m}$

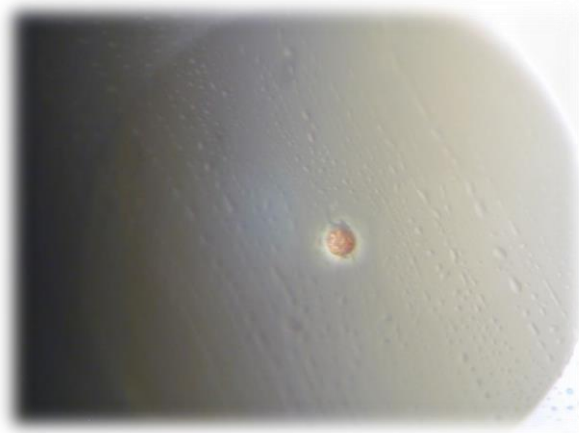
Después del pulimiento con los nuevos materiales el resultado visto con el microscopio de mano fue espectacular pero nos gustaría verlo con más resolución. Después de tomar unas fotografías con el microscopio Nikon MM-11 se observa el progreso conseguido. A continuación se muestran las tres fases; conector pulido con el disco D-50 y con acabado de  $0.02\mu\text{m}$ , conector pulido con el disco "handmade" y por último su estado inicial.



Después del pulido con el disco D50 y hoja de  $0.02\mu\text{m}$



Después del pulido con el disco hecho a mano



Situación inicial



Hemos obtenido un excelente pulido, estamos muy satisfechos con nuestro trabajo. Ahora que disponemos del material y de la experiencia creemos que deberíamos hacer lo mismo con la salida 1 y las fibras de las antenas.

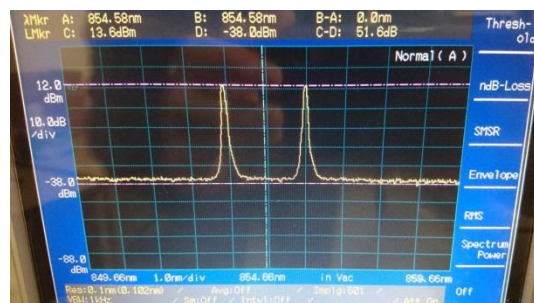
### Medición de potencia y fotocorriente tras el pulido:

Ahora miraremos que las dos salidas del divisor sean simétricas, deberían tener la misma potencia, una vez comprobado revisaremos la fotocorriente de las antenas.

La potencia óptica de las dos salidas del divisor tras el pulimiento ha mejorado mucho, obtenemos los valores esperados. En la salida 1 leemos una potencia de 56,4 mW, antes de pulir teníamos 54mW. La segunda salida teníamos una potencia óptica de 30 mW y ahora nuestro medidor óptico nos muestra 55 mW.

Al ver estos resultados está claro que la Salida 2 estaba en mal estado y era necesario repararla. Después de pulir los conectores de la fibra aumentamos 2.74dBm la potencia óptica de la Salida 2 y lo más importante es que ahora tenemos una potencia simétrica en la salida del divisor.

Usamos un analizador óptico para ver las dos componentes del láser y su potencia óptica. Notamos que el sistema es estable y con la misma potencia en las dos salidas del divisor.



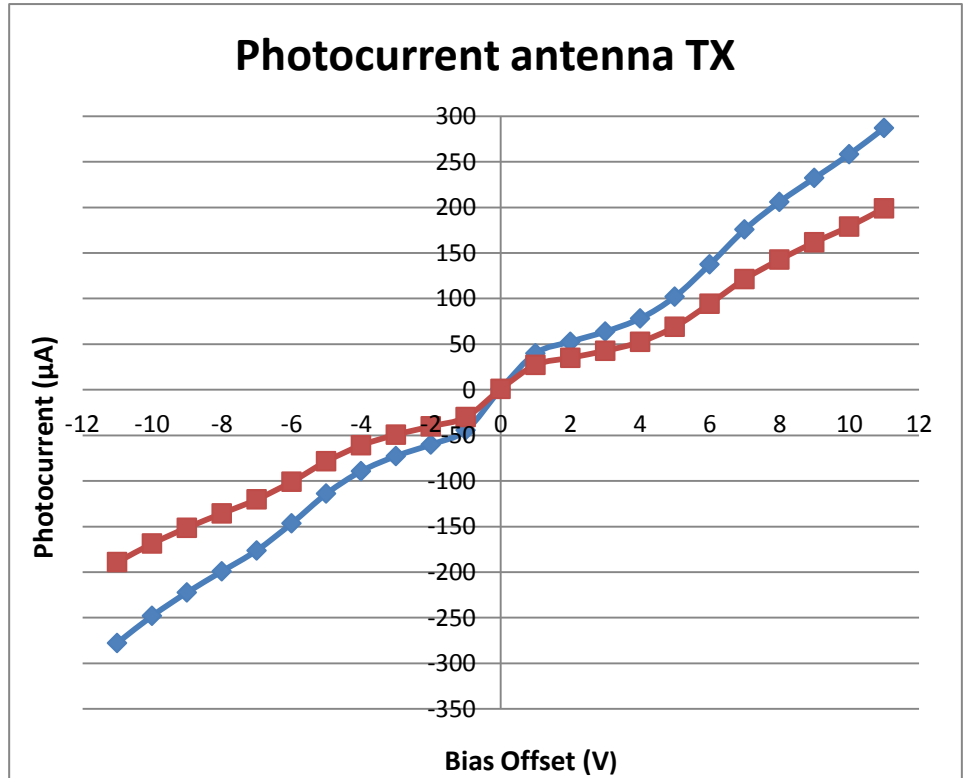
Potencia Óptica medida con Anritsu MS9710A

En la imagen de arriba podemos ver la respuesta de los dos láseres; 853.5 nm y 855.5nm. Como podemos observar las dos frecuencias tienen el mismo nivel. Después de conectar todas las fibras volveremos a alinear el FiberDock para encontrar la potencia óptica máxima entre la salida del láser y el divisor. No debemos olvidarnos de ajustar la presión de los conectores de fibra para obtener un mejor resultado, no siempre por un apriete más fuerte se consiguen mejores valores. Para realizar el ajuste del apriete de los conectores de fibra lo podemos hacer mientras vemos la potencia óptica en el analizador o la fotocorriente de las antenas.

OUT 1

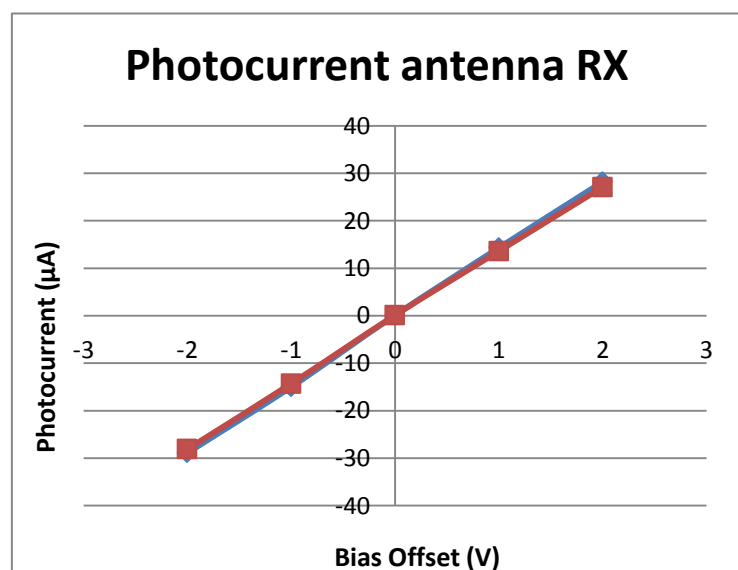
TX Antenna WA36R

Bias Offset (V)	Photocurrent ( $\mu\text{A}$ )
-11	-277,6
-10	-248
-9	-222,3
-8	-199,2
-7	-176,2
-6	-146,6
-5	-114
-4	-89,2
-3	-72,7
-2	-60
-1	-44,5
0	0,9
1	40
2	52,7
3	63,8
4	78,2
5	102,2
6	137,6
7	175,8
8	206,1
9	232,2
10	258,2
11	287



RX Antenna RX006R

Bias Offset (V)	Photocurrent ( $\mu\text{A}$ )
-2	-28,9
-1	-15
0	0,1
1	14,3
2	28,2



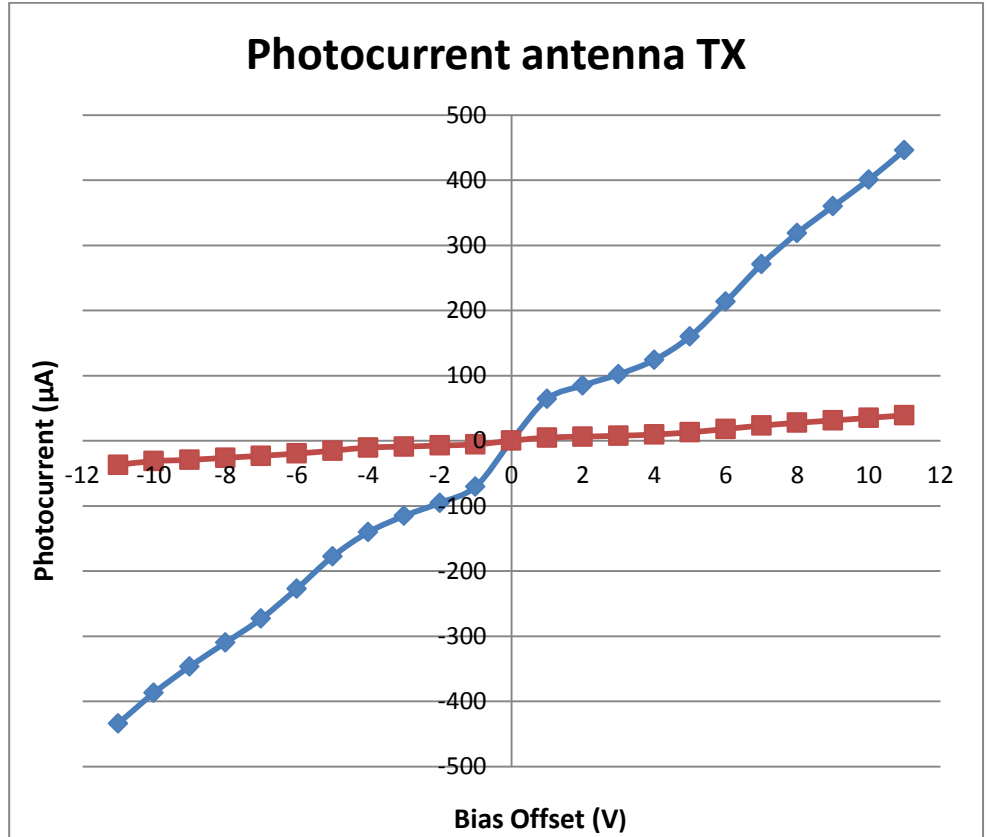
red: before the polished

blue: after the polished

OUT 2

TX Antenna WA36R

Bias Offset (V)	Photocurrent (µA)
-11	-434
-10	-387
-9	-346,5
-8	-310
-7	-273,1
-6	-227
-5	-177,5
-4	-140,3
-3	-115,4
-2	-95,3
-1	-70,3
0	0,1
1	64,1
2	84,9
3	102,1
4	124,1
5	160,1
6	213,5
7	271
8	318,8
9	360
10	400,7
11	446,1

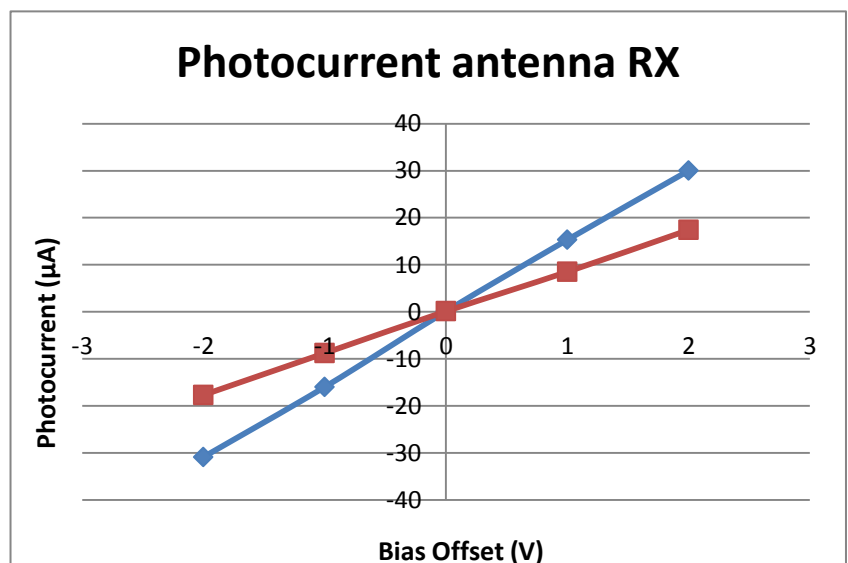


Rx Antenna RX006R

Bias Offset (V)	Photocurrent (µA)
-2	-30,9
-1	-16
0	0,1
1	15,3
2	30

red: before the polished

blue: after the polished



## ¿Cómo responden las antenas a la potencia óptica?

Intentaremos reducir la potencia óptica para ver qué respuesta tiene la fotocorriente de las antenas. Cambiamos la corriente del láser 1 y el láser 2 a los siguientes valores;

L1: 100mA a 24°C

L2: 100mA a 22.3°C

La fotocorriente que obtenemos en nuestras antenas es menor que antes, como se esperaba ya que hemos disminuido la potencia del láser.

Antena Tx: 11,6 mA - 11 VCA (bias)

Antena Rx: 18mA - 2 VCA (bias)

Las medidas fueron tomadas con la salida dos del divisor. Hemos visto que la antena parece responder a una menor potencia óptica con menos fotocorriente.

Hemos visto lo que responden con menos fotocorriente si bajamos la potencia óptica, pero ¿qué ocurre si subimos?

No debemos exceder el límite de potencia de entrada de las antenas, sin embargo, no podemos confirmar qué potencia reciben así que intentamos subir la potencia del láser cambiando a un mayor valor de corriente (poco a poco) sin llegar a saturar.

Nos encontramos que la antena receptora no aumenta la fotocorriente y el transmisor aumenta un poco.

Estamos seguros de que estamos enviando la potencia óptica correcta a las antenas. Tal vez haya un problema para producir la fotocorriente dentro de la antena.

## Controlador de polarización

La birrefringencia es inducida por el bucle en la fibra, no por la torsión de los discos. El eje rápido de la fibra, que está en el plano de la bobina, se ajusta con respecto al vector de polarización transmitido girando manualmente las paletas para torcer la fibra.

Para transformar un estado de polarización de entrada arbitrario en una salida de polarización arbitraria se necesita una combinación de tres discos (una placa para un cuarto de onda, otra de media onda, y una de cuarto de onda) o dos discos (cada uno de un cuarto de onda).

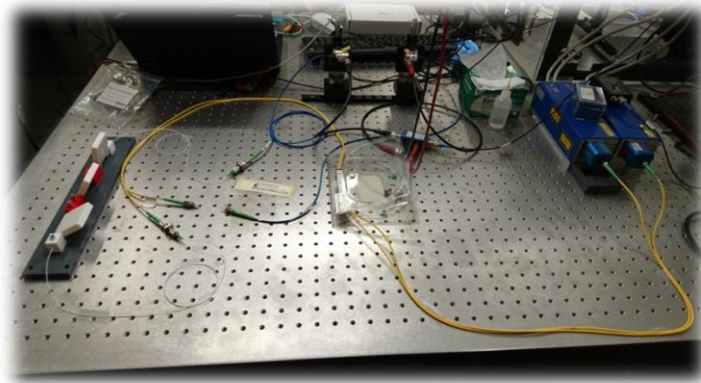
El retardo de cada disco se puede estimar a partir de la siguiente ecuación:

$$\varphi(\text{Radians}) = \frac{2\pi^2 a N d^2}{\lambda D}$$

$$\varphi(\text{Waves}) = \frac{\pi a N d^2}{\lambda D}$$

“ $\phi$ ” es el retardo, “ $a$ ” es una constante (0.133 para la fibra de silicio), “ $N$ ” es el número de bucles, “ $d$ ” es el diámetro del revestimiento de la fibra, “ $\lambda$ ” es la longitud de onda, y “ $D$ ” es el diámetro del bucle.

Si bien esta ecuación es para fibra desnuda, la solución para fibra encamisada de  $\varnothing 900 \mu\text{m}$  será lo suficientemente similar como para que los resultados de esta ecuación puedan ser utilizados (es decir, la solución no variará con un ciclo completo “ $N$ ” para una fibra con revestimiento de  $\varnothing 900 \mu\text{m}$ ).



Montaje control de polarización fibra