

Tesis de Licenciatura



Universidad
de
Buenos Aires

FCEyN

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Física

**Construcción e implementación de un
sistema integral de caracterización de
filtros ópticos de interferencia de banda
utilizados en cámaras hiperspectrales.**

Juan Reto Reynal

Director: Prof. Dr. Hernán Grecco
Abril 2019

Poděkování

Prohlášení

Abstrakt

Rozvíjíme ...

Klíčová slova:

Director: Prof. Dr. Hernán Grecco
Laboratorio de Electrónica Cuántica, DF,
FCEyN, UBA.

Abstract

We develop ...

Keywords:

Title translation: Planting Uranium

Obsah

Plan de Tesis - Juan Reto Reynal	1
Objetivo general	1
Objetivos específicos del proyecto ...	2
Introducción	2
Actividades asociadas al objetivo 1 -	
Mayo:	4
Armado de distintos setups de iluminación o detección para distintas longitudes de onda para analizar los espectros de transmisión de los filtros.	4
Actividades asociadas al objetivo 2 -	
Junio:	8
Armado de distintos setups de iluminación o detección para distintas longitudes de onda para analizar los espectros de transmisión de los filtros.	8
Factibilidad	8
Referencias	8
1 Conclusion	11
Referencias Bibliográficas	13

1 Esquema de una cámara hiperespectral. El filtro absorbe el espectro completo de la luz incidente salvo la banda espectral que el usuario determina, por lo que sólo las longitudes de onda elegidas atraviesan el filtro y son detectadas por el sensor. [2]	3
2 Discrepancias entre las mediciones experimentales con espectrómetros comerciales y el espectro "real" de un filtro óptico. Adaptado de [6].	4
3 Distintas mediciones de la OD de un filtro LP03-532RE- 25 RazorEdge de la empresa Semrock. Las mediciones fueron realizadas utilizando tanto espectrómetros comerciales como <i>custom-made</i> de la emppresa con una variedad de arreglos experimentales que se explican en el texto. Adaptado de [6].	5
4 Diseño básico de un espectrómetro <i>custom-built</i> que utiliza una fuente de iluminación de banda ancha y permite la recolección de una amplia gama de longitudes de onda simultáneamente con un conjunto de detectores situados en la cámara. Este arreglo experimental permite una medición más rápida con un piso de ruido y una resolución fijas. Adaptado de [6].	6
5 Arreglo experimental compatible con la producción industrial para medir valores de OD altos.	7



Plan de Tesis - Juan Reto Reynal

TÍTULO: Construcción e implementación de un sistema integral de caracterización de filtros ópticos de interferencia de banda utilizados en cámaras hiperspectrales.

ALUMNO: Juan Reto Reynal L.U. 777/12.

DIRECTOR: Dr. Hernán E. Grecco, Inv. Indep. CONICET, Prof. Adj. UBA.

LUGAR DE TRABAJO: LEC, Departamento de Física, FCEyN, UBA.



Objetivo general

Los filtros ópticos utilizados en la construcción de cámaras hiperspectrales y multiespectrales resultan fundamentales en aplicaciones como la microscopía de fluorescencia [4] y la espectroscopía de reflectancia utilizada para la toma de imágenes hiperspectrales de la superficie de la Tierra [5]. En estas aplicaciones se distinguen claramente dos señales: una señal de entrada que viene dada por la iluminación (excitación) de una muestra ó la incidencia de la luz sobre la Tierra y, una señal de respuesta dada por la emisión en una muestra biológica ó la reflexión en el caso de la superficie de la Tierra.

Ambas señales no son solo espectralmente distintas sino que además difieren en su intensidad: la señal de entrada puede ser un millón de veces (o más aún) más intensa que la señal de respuesta (reflexión/emisión). En consecuencia, la capacidad de los filtros ópticos para transmitir ciertas longitudes de onda deseadas y bloquear el resto, resulta crítica para estas aplicaciones. Ahora bien, cuando el ancho de banda centrado en una cierta longitud de onda central que se desea transmitir es muy estrecho, las mediciones de las características espectrales y de transmisión de dichos filtros no suelen ser determinadas con precisión. Más aún, si los filtros son construidos especialmente por un proveedor (*custom-made*) para una cierta aplicación específica, resulta fundamental su caracterización para decidir si incorporar o descartar dichos filtros a la carga útil de la aplicación en cuestión.

En el presente proyecto se propone desarrollar un sistema integral de caracterización de filtros de interferencia de banda con la capacidad de decidir si un filtro está apto o no para ser integrado a las cámaras hiperspectrales incorporadas en los satélites desarrollados por la empresa Satellogic.

■ Objetivos específicos del proyecto

- **Objetivo 0 - Abril:** Revisión del estado del arte.
- **Objetivo 1 - Mayo:** Armado de distintos setups de iluminación o detección para distintas longitudes de onda para analizar los espectros de transmisión de los filtros.
- **Objetivo 2 - Junio:** Armado de distintas configuraciones experimentales controlando distintas formas de iluminar los filtros para poder encontrar los defectos.
- **Objetivo 3 - Agosto:** Construcción e implementación de un primer prototipo de un sistema integral que pueda decidir si un filtro está apto o no para ser integrado al satélite.
- **Objetivo 4 - Septiembre:** Establecer control de una de las cámaras de la empresa Satellogic para poder adquirir las imágenes. Procesar las imágenes tomadas haciendo HDR y búsqueda de características.
- **Objetivo 5 - Octubre:** Armado de un posible setup experimental para poder caracterizar el filtro en su posición final en las cámaras de vuelo del satélite.

■ Introducción

La espectroscopia de imagen hiperespectral (HSI: *Hyperspectral Spectroscopy Imaging*) está siendo desarrollada en numerosas aplicaciones, desde la industria satelital hasta la microscopía de células vivas.

Una imagen a color RGB convencional está compuesta por tres canales de imágenes (bandas): rojo ($\sim 665\text{nm}$), verde ($\sim 550\text{nm}$) y azul ($\sim 470\text{nm}$). Este tipo de imágenes permiten emular la percepción que el ojo humano tiene del color, pero no permiten la detección e identificación de distintos objetos sólidos y líquidos, menos aún determinar sus propiedades. Para ello es necesario obtener el espectro completo del objeto de estudio que es posible a partir de la captura de imágenes multispectrales e hiperespectrales.

Las imágenes multispectrales contienen un número acotado de bandas espectrales de hasta un par de decenas, con un gran ancho de banda (varias decenas de nm); mientras que las hiperespectrales están formadas por un gran número de bandas espectrales (de cientos a miles), con una resolución espectral muy estrecha, de unos pocos nm.

El esquema básico de una cámara hiperespectral de propósito general se muestra en la Figura 1. Los filtros de interferencia de banda utilizados en este tipo de cámaras deben cumplir ciertos requisitos de calidad (no presentar rayones, ni marcas, etc) y ciertas características espectrales y de transmisión antes de ser incorporados a por ejemplo la carga útil de un satélite que va a ser puesto en órbita. En consecuencia, resulta fundamental caracterizar

completamente dichos filtros antes de construir las cámaras de la aplicación de interés.

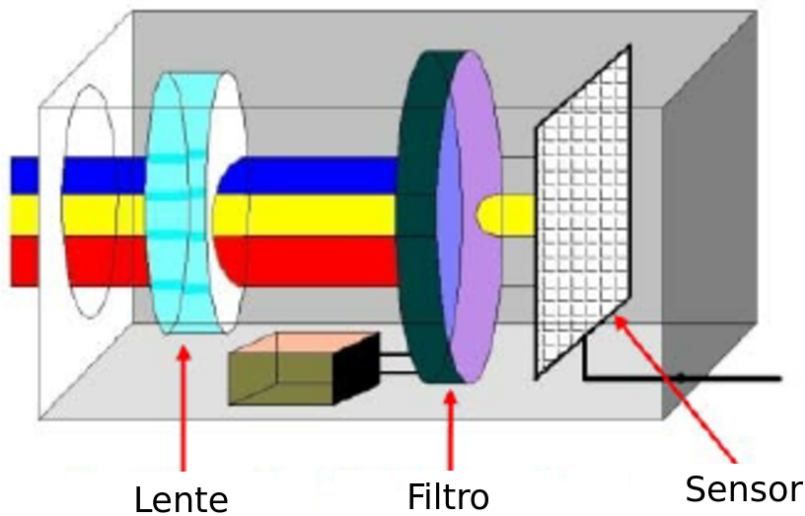


Figura 1: Esquema de una cámara hiperespectral. El filtro absorbe el espectro completo de la luz incidente salvo la banda espectral que el usuario determina, por lo que sólo las longitudes de onda elegidas atraviesan el filtro y son detectadas por el sensor. [2]

Debido a las limitaciones de las técnicas de medición estándar de los espectros de transmisión de los filtros ópticos donde se utilizan espectrómetros comerciales, las características de dichos filtros son determinadas generalmente de forma muy imprecisa, especialmente cuando el ancho de banda de transmisión centrado en una cierta longitud de onda es muy estrecho (menos de una decena de nm para ciertas aplicaciones).

Como resultado de estas limitaciones, existen tres discrepancias fundamentales entre el espectro "real"¹ de un filtro y sus mediciones experimentales realizadas con espectrómetros comerciales (Ver Figura 2)[6]. La primera discrepancia es el "redondeo" de características espectrales nítidas de los filtros. Esto se debe al ancho de banda no nulo del haz de la sonda del espectrómetro.

La segunda discrepancia se debe al rango limitado de medición de la OD² del filtro, que es producto de la sensibilidad limitada del espectrómetro. Cuando un filtro tiene un valor de OD muy alto, $OD > 6$, el detector debería medir una intensidad de la luz prácticamente nula pero el ruido óptico y electrónico propio del detector limita el nivel más bajo de intensidad que puede medir con precisión. De esta forma, se puede ver un ruido de piso debido al sensor indicando un cierto valor de OD que no coincide con el valor real del filtro.

¹El espectro "real" es el espectro de diseño del filtro para el que fue especialmente construido.

²La densidad óptica, OD (Optical Density), es un parámetro útil para describir la transmisión de la luz a través de un filtro óptico con una transmisión extremadamente baja. Si T es la transmisión del filtro, que varía entre 0 y 1, se define la densidad óptica como $OD = -\log_{10}(T)$.

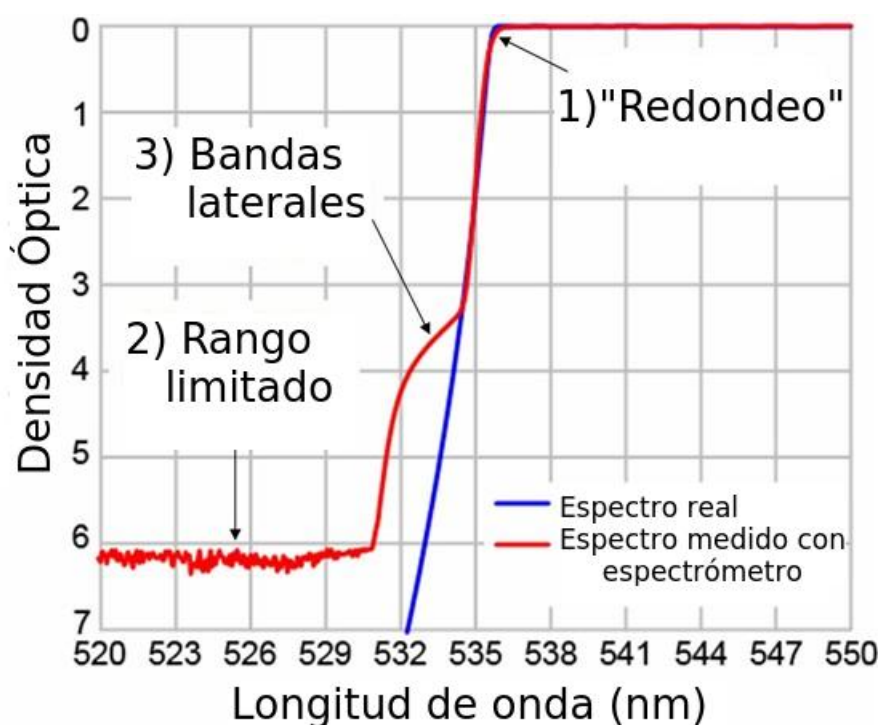


Figura 2: Discrepancias entre las mediciones experimentales con espectrómetros comerciales y el espectro "real" de un filtro óptico. Adaptado de [6].

La tercera discrepancia es propia de las mediciones de transiciones muy pronunciadas. Esto surge por el hecho de que el haz de la sonda no es monocromático, sino que también tiene bandas laterales débiles de longitudes de onda fuera de su ancho de banda principal.

Ahora bien, dependiendo de la aplicación, las limitaciones en las mediciones del espectro de transmisión de los filtros pueden ser determinantes o no. En el presente proyecto se quiere determinar el arreglo experimental óptimo pero que sea compatible con los tiempos y costos de producción de la industria satelital.

■ Actividades asociadas al objetivo 1 - Mayo:

■ Armado de distintos setups de iluminación o detección para distintas longitudes de onda para analizar los espectros de transmisión de los filtros.

Las discrepancias de medición en espectrómetros convencionales causan importantes problemas al intentar evaluar el rendimiento del filtro para la aplicación prevista.

La elección del instrumento de medición y la técnica empleada determinan la precisión de la medición del espectro de transmisión del filtro. Al mismo tiempo, determinan la duración y por ende también el costo de dichas medi-

ciones, que deben ser compatibles con los tiempos que la industria requiere. Esto se puede ver con un ejemplo tomado de [6]. En la Figura 3 se muestran cinco mediciones distintas de la densidad óptica de un filtro diseñado para bloquear longitudes de onda de 532 nm con $OD > 6$ y tener una transición a un estado de alta transmisión dentro del 0.5% de la longitud de onda del láser utilizado para excitar la muestra, que es de 534.7nm.

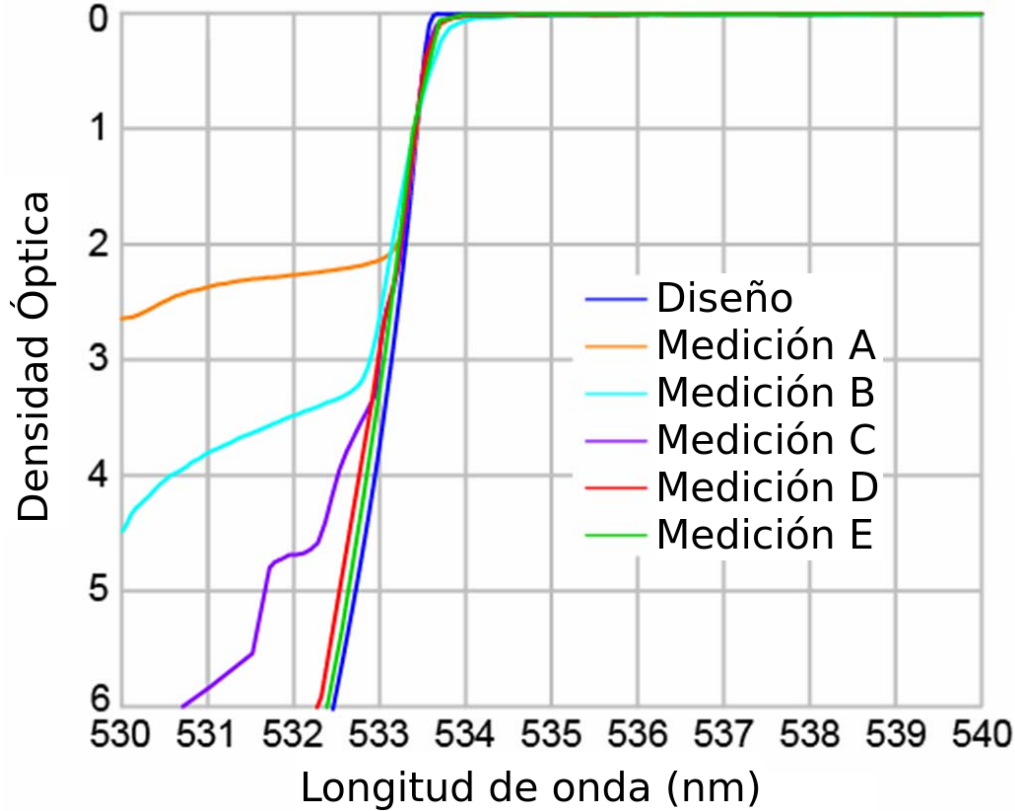


Figura 3: Distintas mediciones de la OD de un filtro LP03-532RE- 25 RazorEdge de la empresa Semrock. Las mediciones fueron realizadas utilizando tanto espectrómetros comerciales como *custom-made* de la empresa con una variedad de arreglos experimentales que se explican en el texto. Adaptado de [6].

Las mediciones del método A fueron realizadas por un espectrómetro de diseño propio (*custom-built*) de la empresa, que tiene un tiempo de integración muy corto y una baja resolución, lo que resulta en una configuración experimental óptima para obtener mediciones de una gran cantidad de filtros de prueba. Este método es utilizado para determinar con precisión la longitud de onda a partir de la cual el filtro pasa a tener una alta transmisión, es decir, localiza la longitud de onda de la transición entre el estado de bloqueo y de transmisión del filtro, la longitud de onda de corte. De esta forma, se garantiza una cierta uniformidad en un lote de filtros a ser utilizado de una forma rápida y eficiente. Ahora bien, como se observa en el gráfico de la Figura 3, el método A posee una sensibilidad muy mala y una resolución muy baja, obteniéndose un piso de ruido mayor a OD 2.

El método B utiliza un espectrómetro comercial (Perkin Elmer Lambda 900) cuyos inconvenientes fueron explicados a partir de las tres discrepancias en la Figura 2. Con este método no se puede asegurar que el filtro tenga un $OD > 6$ en los 532nm.

Los métodos C y D utilizan el mismo espectrómetro *custom-built* del método A, cuyo principio de funcionamiento básico se muestra en la Figura 4. La diferencia fundamental con el método B que utiliza un espectrómetro comercial es que las mediciones con el espectrómetro *custom-built* realizan la detección con una cámara CMOS de bajo ruido, que consiste en un arreglo de detectores, por lo que puede medir en un rango muy grande de longitudes de onda simultáneamente. Este método permite en consecuencia obtener mediciones en un rango espectral muy grande, con una cierta resolución en un cierto tiempo de integración, de forma muy rápida. El inconveniente fundamental de este método es que al utilizar una fuente de iluminación de banda ancha, si el filtro de prueba tuviera, por ejemplo, una autofluorescencia apreciable [3], podría interferir con una medición precisa de la transmisión de la muestra.

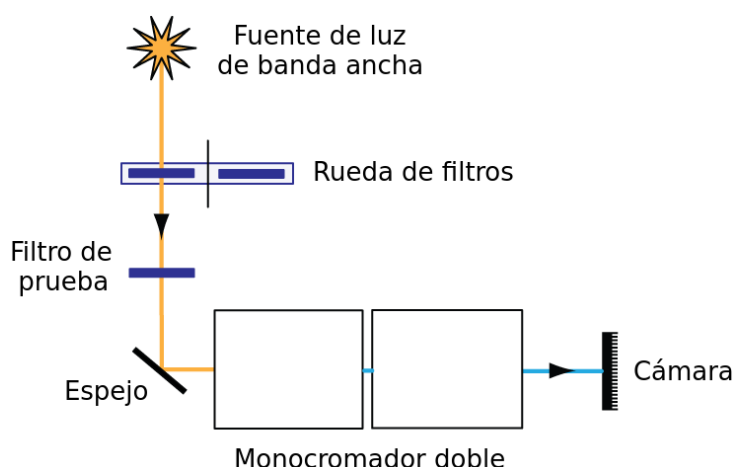


Figura 4: Diseño básico de un espectrómetro *custom-built* que utiliza una fuente de iluminación de banda ancha y permite la recolección de una amplia gama de longitudes de onda simultáneamente con un conjunto de detectores situados en la cámara. Este arreglo experimental permite una medición más rápida con un piso de ruido y una resolución fijas. Adaptado de [6].

En ciertos filtros y aplicaciones, resulta de vital importancia el nivel de bloqueo de ciertos rangos de longitudes de onda pero no así la suavidad de la transición entre el bloqueo y la transmisión. Por ejemplo, en sistemas de imágenes de fluorescencia los espectros de absorción y emisión del fluoróforo podrían estar lo suficientemente alejados como para que resulte fundamental que los filtros de banda de la señal de respuesta (de emisión) de la muestra tengan un bloqueo muy alto en la banda de la señal de excitación y así lograr una relación entre la señal y el ruido de adecuada proporción.

Los filtros diseñados para estas aplicaciones podrían tener decenas de OD de bloqueo pero en la práctica incluso el más pequeño de los defectos físicos

en los recubrimientos ópticos (*coatings*) o en el montaje, así como el bajo nivel de control de luz parásita a nivel del sistema (**), puede limitar el bloqueo alcanzable a valores mucho menores que los del diseño original, en el rango de aproximadamente OD 6 a quizás 10. (forma indirecta de medir los scratch and dig!!**))

Dado que los espectrómetros comerciales estándar tienen una medición de OD de rango limitado debido al ruido de fondo del instrumento, se propone un arreglo experimental inicial para poder medir los niveles de bloqueo más altos con precisión como se muestra en la Figura 5 y que resulta compatible con la producción industrial deseada por su simplicidad.

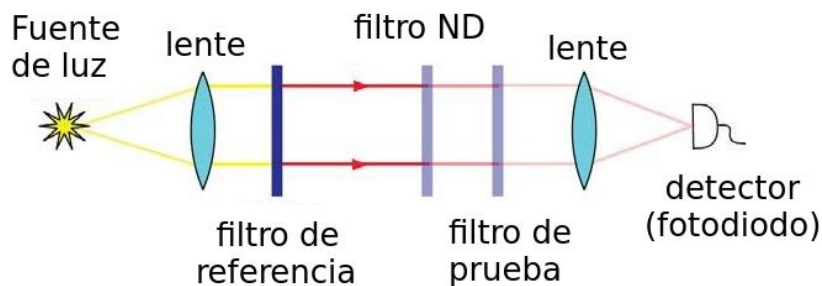


Figura 5: Arreglo experimental compatible con la producción industrial para medir valores de OD altos.

El método experimental de la Figura 5 se denomina *complementary filter method*. Un haz de luz de banda ancha, de una lámpara QTH (*Quartz-Tungsten Halogen*) ó de arco, aproximadamente colimado por una lente es filtrado utilizando un filtro de referencia ampliamente bloqueador, que es esencialmente un filtro de banda con su banda de paso superpuesta a la región del espectro del filtro de prueba que se quiere analizar donde la medición de valores de OD altos son necesarios. La luz transmitida es enfocada con una lente convergente en un detector de bajo ruido capaz de medir niveles de intensidad de luz muy pequeños, como un fotodiodo de gran área con un circuito amplificador de bajo ruido ó un tubo fotomultiplicador (PMT).

Las mediciones se realizan de la siguiente manera. En primer lugar, se mide la intensidad de la señal en el detector con solo el filtro de referencia y un filtro calibrado de densidad neutra (ND) en la trayectoria de la luz. El filtro ND sirve para reducir el nivel de la intensidad de la luz en el detector en una cantidad calibrada de forma tal que el bias ³ del rango dinámico limitado alcanzable por el detector sea reducido para alcanzar los niveles de la señal que el detector va a ver cuando se coloquen los filtros de prueba. En particular, con un filtro ND 3, el rango dinámico del detector tiene que ser de 10^6 para medir hasta un valor de OD 9 de bloqueo. En segundo lugar, se retira el filtro ND y se lo reemplaza por el filtro de prueba para realizar una nueva medición de la intensidad con el detector. El cociente entre las dos mediciones de intensidad de la luz es igual al valor de OD del filtro de

³El bias del detector es el valor medido por el instrumento cuando no hay ninguna fuente de luz incidiendo sobre él, es el valor de *offset* que se le suma a cualquier medición.

prueba, en el rango espectral del filtro de referencia.

■ Actividades asociadas al objetivo 2 - Junio:

- Armado de distintos setups de iluminación o detección para distintas longitudes de onda para analizar los espectros de transmisión de los filtros.

The actual blocking provided by a filter is determined not only by its designed spectrum, but also by physical imperfections of the filter, such as pinholes generated during the thin-film coating process, dirt and other surface defects, or flaws in the filter mounting. Pinholes can allow light to pass through the filter unblocked – a single 10 μm pinhole (that penetrates completely through the coating) limits the blocking of a 10 mm diameter beam to at most OD 6, regardless of the designed level of blocking of the filter spectrum. Other surface and mounting imperfections can cause scattered light that “leaks” through the filter due to a shift of the spectrum to a region of high transmission for scattered light at high angles of incidence, or via unblocked paths near the edges or mounting. Therefore, it is important to evaluate the blocking performance of filters after they have been fully manufactured into finished products.

Factibilidad

El lugar de trabajo donde el tesista va a desarrollar sus actividades es el Laboratorio de Electrónica Cuántica (LEC) del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA. El LEC cuenta con todas las instalaciones, infraestructura, instrumentos de medición y equipamiento necesarios para llevar a cabo la presente tesis.

El director de la presente tesis es director del LEC y es experto en temas de óptica y fotofísica, áreas principales del proyecto. Además, tiene la experiencia de haber dirigido a una estudiante que realizó la tesis en conjunto con el LEC y la empresa Satellogic, resultando en una experiencia exitosa.

El tesista se encuentra cursando actualmente sus últimas dos materias de la carrera: Estructura de la Materia 4 e Instrumentación y Control.

El tesista junto a su director firmarán un NDA (Non-Disclosure Agreement) que le permitirán acceder a información importante para lograr el presente proyecto de tesis.**

Referencias

1. [Hagen 2013] Nathan Hagen , Michael W. Kudenov. Review of snapshot spectral imaging technologies. *Optical Engineering* 52(9), 090901.
2. [Keshava 2003] Nirmal Keshava. A Survey of Spectral Unmixing Algorithms. *Lincoln Laboratory Journal*, Vol. 14, 1, 2003.

3. [Sellar 2005] R. G. Sellar and G. D. Boreman, "Comparison of relative signal-tonoise ratios of different classes of imaging spectrometer," *Appl. Opt.* 44(9), 1614–1624 (2005).
4. [Eismann 2012] M. T. Eismann, *Hyperspectral Remote Sensing*, SPIE Press, Bellingham, WA (2012).
5. [Harvey 2000] A. R. Harvey et al., "Technology options for imaging spectrometry," *Proc. SPIE* 4132, 13–24 (2000).
6. [Prieto 2008] X. Prieto-Blanco et al., "Optical configurations for imaging spectrometers," *Comput. Intell. Rem. Sens.* 133, 1–25 (2008).
7. [Atherton 1981] P. D. Atherton et al., "Tunable Fabry-Perot filters," *Opt. Eng.* 20(6), 806–814 (1981).
8. [Antila 2012] J. Antila et al., "Spectral imaging device based on a tuneable MEMS Fabry-Perot interferometer," *Proc. SPIE* 8374, 83740F (2012).
9. [Gupta 2008] N. Gupta, "Hyperspectral imager development at Army Research Laboratory," *Proc. SPIE* 6940, 69401P (2008).
10. [Poger 2001] S. Poger and E. Angelopoulou, "Multispectral sensors in computer vision," Technical Report CS 2001-3, Stevens Institute of Technology (2001).
11. [Potter 1972] A. E. Potter, "Multispectral imaging system," U.S. Patent No. 3702735 (1972).
12. [Descour 1996] M. R. Descour, "The throughput advantage in imaging Fouriertransform spectrometers," *Proc. SPIE* 2819, 285–290 (1996).
13. [Harvey 2004] A. R. Harvey and D. W. Fletcher-Holmes, "Birefringent Fourier-transform imaging spectrometer," *Opt. Express* 12(22), 5368–5374 (2004).
14. [Mooney 1995] J. M. Mooney, "Angularly multiplexed spectral imager," *Proc. SPIE* 2480, 65–77 (1995).
15. [Fernandez 2007] C. Fernandez et al., "Longwave infrared (LWIR) coded aperture dispersive spectrometer," *Opt. Express* 15(9), 5742–5753 (2007).
16. [Gehm 2008] M. E. Gehm et al., "High-throughput, multiplexed pushbroom hyperspectral microscopy," *Opt. Express* 16(15), 11032–11043 (2008).
17. [Zimmermann 2005] Timo Zimmermann. *Spectral Imaging and Linear Unmixing in Light Microscopy*. *Adv Biochem Engin/Biotechnol* (2005) 95: 245– 265
18. Shima DT, Scales SJ, Kreis TE, Pepperkok R (1999) *Curr Biol* 9:821
19. Ellenberg J, Lippincott-Schwartz J, Presley JF (1999) *Trends Cell Biol* 9:52
20. [Wouters 2001] Wouters FS, Verveer PJ, Bastiaens PI (2001) *Trends Cell Biol* 11:203



Capítulo 1

Conclusion

Lorep ipsum [?]



Referencias Bibliográficas

- [1] Muhammad Mateen, Junhao Wen, Nasrullah and Muhammad Azeem Akbar, “The Role of Hyperspectral Imaging: A Literature Review” International Journal of Advanced Computer Science and Applications(IJACSA), 9(8), 2018. <http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2018.090808>
- [2] Martínez-Usó, Adolfo & Pla, Filiberto & Sotoca, José & García-Sevilla, Pedro.(2008). From Narrow to Broad Band Design and Selection in Hyperspectral Images. 5112. 1091-1100. 10.1007/978-3-540-69812-8_109.
- [3] Kamal G. Shah y Paul Yager.Wavelengths and Lifetimes of Paper Autofluorescence: A Simple Substrate Screening Process to Enhance the Sensitivity of Fluorescence-Based Assays in Paper. Anal. Chem. 2017, 89, 22, 12023-12029. 2017.
- [4] Hernán E. Grecco, Sarah Imtiaz y Eli Zamir. Multiplexed imaging of intracellular protein networks. 2016.
- [5] David W. Hogg y Dustin Lang. “Astronomical imaging: The theory of everything”. AIP Conference Proceedings. Vol. 1082. 2008, págs. 331-338. arXiv: 0810.3851.
- [6] Turan Erdogan y Prashant Prabhat. Semrock Technical Note Series: Measurement of Optical Filter Spectra.