Caracterización y Calibración de Monocromadores Usando Diferentes Fuentes De Luz

Ehimar Andrés Vargas,
* Ph.D Mayerlin Núñez Portela,
** and José Ricardo Mejía ***

Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

(Dated: Junio 2024)

En el presente estudio, se abordó la calibración y caracterización de dos monocromadores modelo 9072 de Sciencetech, un proceso esencial para su aplicación precisa en espectroscopía. Se empleó una fuente de Argón para la calibración y se estudiaron cuatro conceptos clave: resolución, exactitud, precisión y calibración. En cuanto a la resolución, se analizó cómo las aperturas mejoran la capacidad del aparato para distinguir entre dos picos cercanos (resolución). Sin embargo, se observó que las aperturas también afectan el ancho a media altura (FWHM) de los datos. Para evaluar la exactitud, se compararon los datos proporcionados por el monocromador con los valores de referencia del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST). Se realizaron ajustes a los datos del monocromador para mejorar su exactitud. La precisión del monocromador se estudió en función del FWHM y las aperturas. Finalmente, en el proceso de calibración, se buscaron los parámetros en los que los monocromadores presentaban la máxima exactitud. Cabe destacar que cada monocromador se calibró de manera independiente.

I. INTRODUCCIÓN

Los monocromadores (MC) son dispositivos ópticos que seleccionan componentes espectrales estrechos de la luz. Esto se puede lograr con la ayuda de elementos ópticos dispersivos, como las rejillas de difracción [1]. Un MC se distinguen por la disposición de los elementos ópticos en su interior. El tipo de MC más común es el Czerny-Turner mostrado en la figura (1).



Figura 1. Monocromador Czerny-Turner no cruzado. S rendijas de entrada y salida. M espejos esféricos. G rejilla de difracción.

Las rendijas S están posicionadas en los puntos focales de los espejos esféricos M, lo que permite transformar el haz de luz divergente en un haz paralelo. La red de difracción plana G puede girar para seleccionar la longitud de onda que pasa a través de la rendija de salida [2]. La principal característica del monocromador Czerny-Turner es su alta resolución espectral, que puede variar entre 0.1 nm y 2 nm [2].

El presente trabajo aborda el estudio de los MC 9072 ScienceTech® presentes en el laboratorio de óptica cuántica de la universidad de los Andes. Los MC son de gran importancia para el laboratorio debido a su uso es experimentos avanzados. Este proyecto experimental tiene como objetivo la caracterización y calibración de los monocromadores usando diferentes fuentes de luz partiendo de cuatro términos importantes: resolución, exactitud, precisión y calibración. Así mismo poder definir un rango de calibración en términos de longitudes de onda y dar parámetros para su correcto funcionamiento.

II. METODOLOGÍA

El laboratorio de óptica cuántica cuenta con dos MC denominados Slave y Máster. El proceso de calibración se realizará de forma separada para cada MC. Para la calibración inicial se usa la fuente de luz HG-1 Mercury Argon de Ocean Optics [3]. La lámpara HG-1 cuenta con conector de fibra óptica cuyas las líneas de emisión en el Argón comienzan desde los 600 nm hasta los 1000 nm.

^{*} Correo: e.vargasm@uniandes.edu.co

^{**} Correo: m.nunez@uniandes.edu.co

^{***} Correo: jr.mejia1228@uniandes.edu.co

A. Monocromador modelo 9072

Los MC a calibrar son del tipo Czerny-Turner mencionado anteriormente. El arreglo óptico interior del MC se muestra en la siguiente figura.



Figura 2. Monocromador 9072 ScienceTech (\mathbb{R}) montaje interior de instrumentos, S rendijas de entrada y salida. M espejos esféricos. G red de difracción motorizada

La principal característica de este modelo es la red de difracción motorizada. Esta característica permite realizar barridos en un rango determinado de longitudes de onda controlado por software. Las aperturas S, son las rendijas de apertura micrométricas modelo (SS-80) Bilaterally Adjustable Slit.

La red de difracción motorizada hace que el MC no tenga linealidad entre la longitud de onda y el ángulo de rotación de la red[2]. Sin embargo, este es el punto de partida para realizar la calibración. La fórmula de ajuste aplicada es

$$\lambda_{\text{cal}} = a_0 + a_1 \cdot \lambda_{\text{uncal}} + a_2 \cdot |\sin\left(2\pi \cdot a_3 \cdot \lambda_{\text{uncal}} + a_4\right)| \quad (1)$$

Donde λ_{cal} es el valor esperado. λ_{uncal} representa los valores de longitud de onda entregados por el MC sin calibrar. Los valores a_n son los parámetros de corrección a la longitud de onda. Esta calibración es importante tendera a corregir las diferencias entre valores experimentales y los esperados, lo que permitirá mejorar la exactitud en los valores entregados por el monocromador.

B. Montaje experimental



Figura 3. Montaje experimental para el proceso de calibración. 1. óptica con lente colimador acoplado a fibra singlemode. 2. Lente de enfoque (Distancia focal 125 mm).

El montaje experimental incluye la lámpara HG-1, sistema óptico de entrada y salida, un módulo contador de fotones individuales SPCM, un módulo FPGA para la conversión de pulsos en conteos, y un PC para la toma de datos y el control de los MC. El sistema óptico de entrada al monocromador está conformado por una lente (L1) que colima la luz que sale de una fibra multimodo. La luz es enfocada en las aperturas de entrada del monocromador con una lente (L2). En la salida tenemos un sistema similar que permite acoplar la luz que sale del monocromador con a una fibra multimodo. La figura (4) ilustra este sistema óptico.

La óptica de entrada y salida de un MC es fundamental para su correcto funcionamiento. Es crucial garantizar que la luz que sale de la fibra esté enfocada correctamente en la rendija de apertura del MC. Se realizó una revisión exhaustiva y se verificó la alineación precisa de todos los elementos ópticos, utilizando un láser visible para asegurar un punto de enfoque óptimo sobre la rendija de entrada.



Figura 4. Diagrama de la óptica de entrada y salida de cada MC. Distancia focal 125 mm.[4]

C. Caracterización

Se comenzó la caracterización midiendo el espectro de Argón usando como fuente la lámpara HG1 desde los 600 nm hasta los 1000 nm con un tiempo de integración de 50 ns en pasos de 0.2 nm. Los datos entregados por el MC fueron analizados usando el software de Igor aplicando un ajuste de tipo gaussiano para hallar el centro del pico, en este caso el valor $\lambda_{\text{experimental}}$.



Figura 5. Resultados primera medición MC máster. El ajuste no se aplica de buena manera a los datos debido a los ceros que se observan en los dentro de cada pico.

Las aperturas de un MC permiten modular su bandpass. Este término se define como las longitudes de onda que entran al MC. Una aproximación para definir el Band-pass en un MC es:

$$BP = \frac{w \cdot d}{m \cdot f} \tag{2}$$

Donde w es el ancho de las aperturas, d es el espaciado de la red de difracción (830 l/mm), m es el orden de difracción y f la distancia focal.

Cada pico entregado por el MC tiene una característica que usaremos para realizar la calibración y su caracterización, el Full Width Half Maximum (FWHM). FWHM se define como la anchura a media altura del pico [5], siendo este valor el doble del Band-pass. De la ecuación (2) podemos ver que el único parámetro libre es w, el ancho de las rendijas de apertura y salida del MC. Por lo tanto, fue el punto de partida para comenzar la caracterización.

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se realizaron mediciones utilizando el MC principal, variando la apertura desde 0.03 mm hasta 1.1 mm de forma simétrica en las aperturas. Con estos datos, se observa la variación de FWHM para cada valor de apertura. Al disminuir los valores de apertura se observa una disminución en los valores de FWHM, lo cual concuerda con la noción de bandpass del MC (1). Esto nos proporciona una relación entre los valores de apertura y FWHM. Sin embargo, el menor valor de FWHM se encuentra en 0.04 mm de apertura, considerado como el valor óptimo de trabajo para realizar la calibración. los resultados de esta caracterización se muestran en la figura (6).

Las aperturas ajustables de los monocromadores permiten controlar el ancho del Band-pass del dispositivo (2), lo que a su vez influye en el FWHM de los picos espectrales. Se ha determinado que el valor óptimo para estas aperturas, que minimiza el FWHM, es de 0.04 ± 0.01 mm (6).



Figura 6. Valores de FWHM reportados por el ajuste de Igor en función de los valores de apertura

Las aperturas de los MC afectan la cantidad de conteos. Al disminuir los valores de apertura, la intensidad de luz se reduce drásticamente, razón por la cual utilizamos SPCM. La sensibilidad ofrecida por estos módulos nos permite trabajar con valores de apertura menores a 0.05 mm y mantener una relación señal/ruido excepcional, que supera un factor de 10.

Un menor FWHM corresponde a una menor dispersión en los datos, lo que implica una mayor precisión en las mediciones. Además, el FWHM para estas aperturas específicas se calcula en 0.45 ± 0.24 nm. La resolución del MC se define como el doble del ancho del bandpass del dispositivo. El fabricante de los MC reporta que la resolución, utilizando una red de difracción de 8301/mm, es de 0.5 nm. Se observa una similitud en los valores obtenidos.

A. Calibración

El proceso de calibración consiste en usar la lámpara HG-1 de argón y realizar un barrido desde los 600 nm hasta los 1100 nm en pasos de 0.3 nm cada 50 ms, desactivando la calibración ya existente. Se comparan los valores entregados por el MC con los datos teóricos de la NIST reportados para el argón [6]. Para cada pico, se ajusta una función de distribución gaussiana y se reportan los centroides, asegurándose de que los picos dobles alrededor de 800 nm estén bien resueltos. Se traza el valor de los centroides en función de la posición teórica del pico. Realizando el ajuste mencionado anteriormente (1) encontramos los siguientes valores para los a_n .

Calibración de MC		
Parámetro	MC Máster	MC Slave
a_0	-2.6963 ± 1.41	-4.8948 ± 3.03
a_1	0.99546 ± 0.00165	0.99513 ± 0.00383
a_2	-2.9361 ± 0.494	0.66 ± 0.878
a_3	0.005611 ± 0.000154	0.99974 ± 0.0013
a_4	-5.4941 ± 0.796	1.7956 ± 6.56

Cuadro I. Calibración de los monocromadores. Los datos muestran los coeficientes y sus desviaciones estándar correspondiente para el MC máster y el MC slave

Los valores encontrados se configuraron en el software de cada MC por separado. Cada MC cuenta con una calibración inicial. Este hecho es importante al cuantificar las diferencias entre los datos experimentales entregados por el MC no calibrado y los datos de la NIST. Se encontró que el MC máster presenta, en promedio, una diferencia de $\Delta \lambda = -7.67 \pm 0.57$ nm. Por otro lado, el MC slave presenta una diferencia de $\Delta \lambda = -9.17 \pm 0.84$ nm. Analizando los resultados de la lámpara de argón para cada MC encontramos el siguiente resultado



Figura 7. Resultados de la calibración antes y después, el ajuste de aperturas, optimización de luz y cambio en valores a_n de cada MC

La figura (7) ilustra la mejora en la exactitud de los datos antes y después de la calibración en un rango que abarca desde los 700 nm hasta los 1000 nm. Sin embargo, se observa un aumento en la incertidumbre del MC slave.

Finalmente, se usó Neón como fuente de luz para probar el funcionamiento de los monocromadores con la calibración realizada. Los resultados obtenidos se muestran en la figura (8)



Figura 8. Espectro medido para Neón desde los 500 nm hasta los 900 nm.

Se observa nuevamente la efectividad de la calibración del MC en un rango desde los 700 nm hasta los 900 nm. Valores inferiores reportan datos con poca exactitud y baja confiabilidad.

IV. CONCLUSIONES

Se ha logrado una caracterización detallada del funcionamiento de los monocromadores y sus componentes, basándose en cuatro términos fundamentales dentro del mundo experimental: resolución, exactitud, precisión y calibración. Las aperturas de los MC juegan un papel crucial en la resolución del aparato y la precisión de los entregados por el MC. se comprobó que una calibración permite mejorar la exactitud de los datos. Sin embargo, la calibración efectuada solo es efectiva desde los 700 nm hasta los 1000 nm. Los MC permiten medir espectros con una resolución de 0.45 ± 0.24 nm, con una exactitud menor a 0.20 ± 0.12 nm. No obstante, es necesario aumentar el rango de calibración y trabajar con otras fuentes de luz.

- función tipos Lifeder, Monocromador: componentes. Monocromador: componentes, función, tipos. 2020. URL https://www.lifeder.com/monocromador/. Recuperado de: https://www.lifeder.com/monocromador/.
- [2] Vladimir Protopopov. Beam alignment and positioning techniques. *Practical Opto-Electronics*, 1:309–334, 2014. doi:10.1007/978-3-319-04510-4_12. URL https://doi. org/10.1007/978-3-319-04510-4_12. Página 304.

- [3] Ocean Optics. Mercury (hg) calibration source. Ocean Optics Documentation, 1:1-5, Jan 2007. URL https://www.usna.edu/Users/physics/vanhoy/ _files/SP425/LabDocs/Ocean%200ptics%202000/ SpectraSuite/070131_1347%20R/documentation/ Light%20Sources/hg1.pdf. Accessed: 2024-06-01.
- [4] Universidad de los Andes. Reporte intersemestral de proyectos ain 2016. Universidad de los Andes Documentation, 1:1-10, 2016. URL https://opticacuantica.

uniandes.edu.co/images/documents/teaching/ intersemester-projects/Reporte_AIN_2016.pdf.

- [5] Universidad Complutense de Madrid. Fwhm (full width at half maximum). Nuclear Physics Group UCM, 1:1-4, 2016. URL http://nuclear.fis.ucm.es/webgrupo/ labo/archivos/guiones_virtual/pet/fwhm.html.
- [6] Paolo Lipari. Strong lines of argon. Phys. Rev. D, 78: 083011, Oct 2008. doi:10.1103/PhysRevD.78.083011. URL https://physics.nist.gov/PhysRefData/ Handbook/Tables/argontable2.htm.