Dependencia angular de las curvas de transmisión y densidad óptica para diferentes filtros tipo Fabry Perot

Michael Torres Ramírez^{*} Universidad de los Andes

Se midieron las curvas de transmisión y densidad óptica como función del ángulo de incidencia para diferentes filtros utilizados en la detección de fotones enredados, con lo cual fue posible realizar la caracterización de la longitud de onda central y el ancho espectral como función del ángulo. La implementación de este montaje experimental junto con los datos obtenidos permite utilizar un sistema análogo a lo que se conoce como filtro sintonizable. Las propiedades ópticas de los filtros fueron analizadas bajo el modelo teórico de cavidades de Fabry-Perot.

I. INTRODUCCIÓN

La utilización de filtros pasa banda proporciona una de las formas experimentales más simples de manipular luz con una longitud de onda bien definida descartando longitudes de onda que se encuentren fuera del intervalo comprendido por el ancho espectral (ancho a media altura de la curva de intensidad en función de la longitud de onda), por ésta razón la optimización del funcionamiento de éstos instrumentos se ha convertido en un factor importante en el desarrollo experimental de ciencias como la espectroscopia, optoelectrónica, fotónica y la óptica cuántica¹.

Específicamente en el área de la óptica cuántica los montajes experimentales que se llevan a cabo para estudiar propiedades como el enredamiento cuántico entre dos fotones se pueden dividir de manera global en dos etapas importantes: la preparación del estado enredado y la reconstrucción del estado resultante. La utilización de los filtros ópticos es de gran importancia en la primera etapa del experimento, en la cual se hace incidir un láser sobre un cristal no lineal (BBO), produciendo un par de fotones enredados, los cuales tienen una longitud de onda bien definida de 810 nm. Inmediatamente después del cristal se pone el filtro pasa bandas para evitar el paso de fotones con longitudes de onda diferentes a las del sistema bajo estudio. Debido a que las especificaciones de estos filtros y las curvas de transmisión y densidad óptica se conocen solamente para un ángulo de incidencia de $\theta = 0^{\circ}$ surge la pregunta de cómo varía el valor de la longitud de onda central y el ancho espectral de los filtros en función del ángulo de incidencia de la luz.

Para determinar la relación de la $\lambda(\theta)$ (longitud de onda central) y $\Delta\lambda(\theta)$ (ancho espectral) con el ángulo de incidencia de la luz se analiza el comportamiento de las curvas de transmisión y densidad óptica de los filtros para diferentes ángulos de incidencia. Esta caracterización permitiría la detección de fotones enredados con longitudes de onda diferentes a 810 nm, proporcionando una mayor diversidad arreglos experimentales.

Debido a que la construcción de los filtros caracterizados esta basada en el interferómetro de Fabry-Perot existe una expresión analítica que permite analizar el comportamiento de la longitud de onda central λ en función del ángulo de incidencia de la luz θ , mientras que para la dependencia angular del ancho espectral $\Delta \lambda \theta$ no existe ninguna relación funcional reportada hasta el momento.

II. MARCO TEÓRICO

A. Interferómetro de Fabry-Perot

Un filtro o interferómetro de tipo Fabry-Perot, usualmente llamado etalón, consiste en un arreglo de dos placas paralelas reflectoras separadas por aire. Solo aquellas longitudes de onda que son aproximadamente múltiplos enteros de la longitud de separación de las placas es transmitida a través del filtro⁵. Actualmente los filtros construidos en base a este interferómetro cambian el material de separación entre las placas por un material dieléctrico que permita tener un mejor control de las propiedades ópticas de los filtros.

Para ver el funcionamiento de este dispositivo consideremos un haz de luz monocromático proveniente de una fuente S, el cual hace un ángulo θ_t respecto al eje óptico del sistema, como se muestra en la Figura 1.



Figura 1: Representación esquemática del funcionamiento de un filtro tipo Fabry-Perot. Tomada de²

El haz debido a las reflexiones internas dentro de la

cavidad produce una serie de haces coherentes que interfieren en el punto P después de atravesar por el dispositivo, la naturaleza de la superposición en el punto P está determinada por la diferencia de camino óptico que recorre cada rayo de luz, la cual es descrita por la siguiente ecuación

$$2nt\,\cos\theta_t = m\lambda.\tag{1}$$

Otro aspecto importante que se puede estudiar de este tipo de interferómetro es la dependencia angular de la longitud de onda central que pasa a través del filtro, la cual esta descrita por^3

$$\lambda_{\theta} = \lambda_0 \sqrt{1 - \left(\frac{n_m}{n_{ef}}\right) \sin^2 \theta} , \qquad (2)$$

donde λ_0 es la longitud de onda central con incidencia normal, n_m es el índice de refracción del medio y n_{eff} es el índice de refracción efectivo del filtro.

B. Filtro ópticos:

Un filtro óptico pasa bandas es creado mediante la deposición de capas de material sobre la superficie de un sustrato. Típicamente lo que se tiene es material dieléctrico separado por capas de sustrato. El material dieléctrico está compuesto por una gran cantidad de capas que varían desde un índice de refracción bajo a un índice de refracción alto, el espesor de cada capa de material dieléctrico es de $\frac{\lambda}{4}$, donde λ es la longitud de onda central del filtro óptico (es decir la longitud de onda con mayor transmisión a través del filtro). El material que separa a cada conjunto de capas de dieléctrico tienen un grosor de $\frac{n\lambda}{2}$, con n entero. Una representación esquemática de la composición del filtro óptico se muestre en la Figura 2



Figura 2: Representación esquemática de un filtro óptico. Tomado de Thorlabs

En la Figura 2 se representa un filtro óptico construido con una sola cavidad de Fabry-Perot pero en general los filtros pueden estar compuestos por una o varias cavidades en serie.

III. MONTAJE EXPERIMENTAL

Utilizando el espectrómetro de Ocean Optics HR4000CG-UV-NIR se obtuvo el espectro de una fuente de luz de banda ancha con el fin de determinar el valor de la intensidad incidente cuando no se tienen ningún filtro y observar el comportamiento de la intensidad transmitida para los diferentes filtros a medida que se varía el ángulo de incidencia.

Luego de esto se repitió el procedimiento anterior pero ahora introduciendo los filtros entre la fuente de luz y el espectrómetro como se puede ver en la Figura 3, con el fin de determinar el espectro de intensidades para este proceso identificando la longitud de onda central λ y el ancho espectral $\Delta\lambda$, estos resultados para un ángulo de incidencia de $\theta = 0^{\circ}$ se pueden comparar con los reportados por el proveedor de los filtros, identificando las posibles variaciones con respecto al dato ideal, ya que debido a posibles formas de manipulación estos datos pueden tener ligeras variaciones.



Figura 3: Montaje Experimental para la caracterización espectral de los filtros. En donde (1) es la fuente, (2) es el filtro y (3) el espectrómetro Ocean Optics.

Luego de esto se comenzó a variar cada dos grados el ángulo de incidencia de la luz con respecto al filtro θ utilizando el dispositivo mostrado en la Figura 3, hasta que la intensidad se redujera hasta un 10% de la intensidad original, haciendo mediciones para el espectro de intensidades para cada ángulo con el fin de observar la dependencia de la longitud de onda central $\lambda(\theta)$ y el ancho espectral $\Delta\lambda(\theta)$ en función del ángulo de incidencia. Para esto se utilizaron 9 filtros con diferentes valores de ancho espectral $\Delta\lambda = \pm 2$ nm, ± 5 nm y ± 10 nm reportados por el proveedor.

IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La primera medición que se hizo con el espectrómetro fue la caracterización del espectro de la fuente de luz, el cual muestra un rango de longitudes de onda desde aproximadamente 400nm hasta 1000nm como se puede ver en la Figura 4. En este se tienen los valores de intensidad en función de la longitud de onda, de esta manera se puede ver que la fuente utilizada es apropiada para la caracterización de los filtros, ya que estos filtros poseen valores de longitud de onda central de 810nm y 814nm según el fabricante. Las mediciones de intensidad contra longitud de onda fueron hechas utilizando el software Oceanview.



Figura 4: Espectro de longitudes de onda para la fuente de luz, bombillo de tungsteno.

Se caracterizaron el total 9 filtros, cada uno con de ellos con unas especificaciones de longitud de onda central, ancho espectral y número de cavidades diferentes. Con los valores de intensidad y longitud de onda proporcionados por el espectrómetro se construyeron las curvas de transmisión y densidad óptica para cada uno de los filtros en diferentes configuraciones angulares. Posteriormente para cada una de estas configuraciones angulares se determinó el valor de la longitud de onda central y el ancho espectral con el fin de obtener el comportamiento de estas dos variables en función del ángulo.

Debido a que la caracterización de cada filtro está descrita por las cuatro curvas mencionadas anteriormente y al gran número de filtros, fue necesario agrupar los filtros en base al ancho espectral de cada uno. A continuación se va a mostrar la caracterización detallada de un filtro de cada uno de los grupos, la información de los demás se encuentra en la sección Anexos.

A. Filtros ancho espectral $\Delta \lambda = 10 \, nm$

Este grupo esta conformado por un total de 5 filtros, en el cual además de tener el mismo ancho espectral también tienen el mismo valor de longitud de onda central $\lambda = 810$ nm, lo que los diferencia es el número de cavidades de Fabry-Perot utilizadas para su construcción. Cada uno de los filtros posee un nombre en el cual se resumen sus características principales, por ejemplo el filtro escogido para la descripción de este grupo es el 810 FS 10 - 12, 5(Q133 - 01) en donde el primer número

hace alusión a la longitud de onda central, el segundo al valor del ancho espectral, el tercero al diámetro del filtro y la última cifra dentro del paréntesis proporciona información del número de cavidades de Fabry-Perot o tipo de filtro.

1. Filtro 810 FS10-12,5 (Q133-01)

Para construir las curvas de transmisión de cada uno de los filtros es necesario realizar una normalización de la radiación transmitida por el filtro respecto a la radiación que incide desde la fuente. Por ejemplo al poner el filtro el espectro de la fuente en la Fig. 4 toma la siguiente forma:



Figura 5: Espectro de longitudes de onda para la fuente de luz con el filtro Q133-01

En base a lo anterior los datos de la intensidad transmitida los da directamente el espectrómetro como en la Fig. 5 mientras la intensidad incidente se obtiene del espectro de la fuente mostrado en la Fig. 4, con esta normalización se puede determinar la transmisión para cada espectro. El porcentaje de transmisión en función de la longitud de onda se muestra en la Figura 6.



Figura 6: Curvas de transmisión para el filtro Q133-01 en diferentes configuraciones angulares. Las incertidumbre asociadas a estas mediciones se deben dificultad en determinar el valor de la longitud de onda central

En la Figura 6 se puede ver que a medida que se aumenta el ángulo de incidencia entre la radiación incidente y el filtro los espectros presenta un corrimiento hacía longitudes de onda menores acompañado de una disminución en el porcentaje de transmisión, donde se puede ver que hasta 4 grados las diferencias con el espectro de incidencia normal ($\theta = 0$) no son muy relevantes, por otro lado este filtro permite llegar hasta un ángulo de incidencia máximo de $\theta = 12$ ya que en este punto solo se tienen el 10% de transmisión. La forma del espectro de la radiación transmitida esta determinada por el número de cavidades de Fabry-Perot que componen en filtro, para este caso el filtro esta compuesto por solamente una cavidad.

La densidad óptica es una magnitud que proporciona información sobre la cantidad de energía que absorbe el filtro, esta se define como:

$$OD = -\log\left(\frac{T}{100}\right),\tag{3}$$

donde T es el porcentaje de transmisión. En la Figura 7 se muestran las curvas de densidad óptica en función de la longitud de onda, donde se pueden ver los intervalos de longitudes de onda para los cuales el filtro presenta una mayor transmisión y la manera en que el filtro comienza a bloquear longitudes diferentes a medida que se aumenta el ángulo de incidencia.



Figura 7: Curvas de densidad óptica para el filtro Q133-01 en diferentes configuraciones angulares

Este comportamiento se puede describir también a partir de la ecuación 3, ya que un valor alto de densidad óptica significa un porcentaje de transmisión bajo. En la Figura 7 también se puede ver como a medida que se va cambiando la orientación relativa entre el filtro y la radiación, este comienza a seleccionar longitudes de onda diferentes, presentando un corrimiento hacía longitudes de onda menores pero con una densidad óptica cada vez más grande.

De las anteriores curvas se obtiene la información de la longitud de onda central para cada configuración, con lo cual se puede ver el comportamiento de ésta en función del ángulo en la Figura 8.



Figura 8: Dependencia Angular de la longitud de onda central para el filtro Q133-01. La linea solida corresponde al ajuste ajuste dado por la ecuación 2.

Con ayudad de la ecuación 2 fue posible realizar el ajuste que se muestra en la anterior gráfica, el cual muestra una correlación alta entre los datos, por lo tanto concuerda con el modelo teórico de los filtros como cavidades de Fabry-Perot. De los parámetros del anterior ajuste se obtiene que la longitud de onda central para un ángulo de incidencia normal es de $\lambda_0 = 811, 7 \pm 0, 2 nm$ y también se puede conocer el índice de refracción efectivo del filtro es cual es $nef = 2, 80 \pm 0, 02$.

Otro parámetro de interés es el ancho espectral, el cual se muestra en la Figura 9 en una escala bastante reducida en el eje de las longitudes de onda:



Figura 9: Dependencia angular del ancho espectral para el filtro Q133-01

Debido a que hasta el momento no se tiene un modelo teórico que describa el comportamiento del ancho espectral con respecto al ángulo lo único que se puede decir para este filtro es que este valor permanece prácticamente constante a pequeños ángulos y después comienza a crecer, aunque la variación no es considerable ya que todos los puntos caen en el rango de incertidumbres de ± 1 nm. Finalmente para tener una caracterización completa del filtro se muestra en la Figura el comportamiento de la intensidad máxima como función del ángulo de inclinación:



Figura 10: Dependencia angular de la intensidad máxima para el filtro Q133-01. La linea roja representa el ajuste lineal

De la Fig. 10 se observa que la intensidad disminuye linealmente con el ángulo de incidencia, lo que funcionalmente se puede ver como $I = -868\theta + 13340$, lo cual es importante a la hora de utilizar los filtros para cambiar la longitud de onda central ya que al hacerlo se está sacrificando el porcentaje de transmisión de la radiación incidente.

B. Filtros ancho espectral $\Delta \lambda = 5 nm$

Este grupo esta conformado por dos filtros, en el cual además de tener el mismo ancho espectral también tienen el mismo valor de longitud de onda central $\lambda = 814 nm$, lo que los diferencia es el número de cavidades de Fabry-Perot utilizadas para su construcción ya que uno es de tipo 3 (tres cavidades) y el otro tipo 4. El filtro escogido para la descripción de estos dos es 050 FC 814 - 25(V063 - 03) en donde el primer número hace alusión al ancho espectral ($\Delta \lambda = 5 nm$), el segundo al valor es la longitud de onda central ($\lambda = 814 nm$), el tercero al diámetro del filtro y la última cifra dentro del paréntesis proporciona información del número de cavidades de Fabry-Perot o tipo de filtro.

1. Filtro 050 FC814-25 (V063-03)

De igual manera a como se hizo con el anterior filtro se determina el porcentaje de transmisión en función de la longitud de onda como se muestra en la Figura 11



Figura 11: Curvas de transmisión para el filtro V063-03 en diferentes configuraciones angulares. Las incertidumbre asociadas a estas mediciones se deben dificultad en determinar el valor de la longitud de onda central.

Comparando con el anterior filtro el cual era tipo 1 se puede ver que entre mayor sea el número de cavidades de Fabry-Perot utilizadas para construir los filtros el espectro va tomando una forma más gaussiana, lo cual concuerda con^4 . En la anterior gráfica también observa el corrimiento de los espectros hacía longitudes de onda menores a medida que se aumenta el ángulo de inclinación. Otro factor importante es que este filtro presenta mayor transmisión, debido a esto fue posible obtener mayor número de configuraciones angulares, como se puede ver se alcanzó el 10% de transmisión solamente hasta llegar a 32° . Las curvas de densidad óptica se determinan igualmente que para el caso anterior, como se ve en la Figura 12:



Figura 12: Curvas de densidad óptica para el filtro V063-03 en diferentes configuraciones angulares

En la Figura 12 se observa que para este caso se tiene un mayor rango de densidades ópticas y la razón es la expuesta anteriormente ya que este filtro presenta una mayor transmisión, también se puede ver que las curvas de densidad óptica para $\theta = 0$ y $\theta = 32$ no tienen ninguna región en común, es decir que cuando se alcanza la última medición posible se logra bloquear todas las longitudes de onda que eran transmitidas en la incidencia normal.



Figura 13: Dependencia Angular de la longitud de onda central para el filtro V063-03, La linea solida corresponde al ajuste ajuste dado por la ecuación 2

Con ayudad de la ecuación 2 fue posible realizar el ajuste que se muestra en la Figura 13, el cual muestra una correlación alta entre los datos, por lo tanto concuerda con el modelo teórico de los filtros como cavidades de Fabry-Perot. De los parámetros del anterior ajuste se obtiene que la longitud de onda central para un ángulo de incidencia normal es de $\lambda_0 = 814, 4 \pm 0, 3 nm$ y también se puede conocer el índice de refracción efectivo del filtro es cual es $nef = 1, 28 \pm 0, 04$.



Figura 14: Dependencia angular del ancho espectral para el filtro V063-03

En la Figura 14 se observa que el ancho espectral no tiene una dependencia angular predecible si se compara con el resultado obtenido en la Figura 9 en donde a pequeños ángulos este mostró una dependencia lineal. Finalmente se muestra el comportamiento de la intensidad de transmisión máxima como función del ángulo de inclinación:



Figura 15: Dependencia angular de la intensidad máxima para el filtro V063-03

De la Fig. 15 se observa que la intensidad disminuye linealmente con el ángulo de incidencia, lo que funcionalmente se puede ver como $I = -430\theta + 1800$, lo cual es importante a la hora de utilizar los filtros para cambiar la longitud de onda central ya que al hacerlo se está sacrificando el porcentaje de transmisión de la radiación incidente.

C. Filtros ancho espectral $\Delta \lambda = 1 nm$

Este grupo esta conformado por dos filtros, en el cual además de tener el mismo ancho espectral también tienen el mismo valor de longitud de onda central $\lambda = 814 nm$, lo que los diferencia es el número de cavidades de Fabry-Perot utilizadas para su construcción ya que uno es de tipo 5 (cinco cavidades) y el otro tipo 6. El filtro escogido para la descripción de estos dos es 010 FC 814 - 25(V063 - 05).

1. Filtro 010 FC814-25 (V063-05)

Para estos filtros se determinan las curvas de intensidad en función de la longitud de onda para las diferentes configuraciones angulares y se observa un comportamiento completamente diferente a lo observado en los anteriores filtros:



Figura 16: Curvas de transmisión para el filtro V063-05 en diferentes configuraciones angulares

Para pequeños ángulos hasta $\theta = 8^{\circ}$ el espectro tiene una forma gaussiana, pero a medida que se aumenta el ángulo de inclinación entre el filtro y la radiación incidente los espectro comienzan a deformarse de tal manera que aparece algo similar a un segundo pico de intensidad, esto puede pasar debido a la aparición de otro punto en el espacio donde la radiación interfiere constructivamente.

V. CONCLUSIONES

- El comportamiento de la longitud de onda central para los diferentes filtros se ajusta de acuerdo a la teoría de Fabry-Perot, mientras que el ancho espectral mostró un comportamiento lineal para pequeños ángulos de incidencia para los filtros con un ancho espectral de 10nm, en cambio para los filtros de ancho espectral de 5nm este no tiene un comportamiento predecible.
- Al modificar el ángulo de incidencia la longitud de onda central presenta un corrimiento siempre hacía longitudes de onda menores, esto combinado a una disminución lineal en la transmisión. Por esta razón la caracterización de los filtros en base a estas variables permite optimizar la sintonización de las propiedades ópticas en función del ángulo de incidencia.
- Los filtros construidos con varias cavidades de Fabry-Perot presentan un ancho espectral muy angosto, lo cual no los hace aptos para implementarlos en el mecanismo de ángulo variable estudiado es este trabajo, ya que los espectros se deforman con pequeñas variaciones en el ángulo.

- ² Leno S. Pedrotti Frank J. Pedrotti. Introduction to optics. Prentice Hall, 2nd ed edition, 1993.
- ³ H.A. Macleod. Thin-film optical filters. Series in Optics and

Optoelectronics. Institute of Physics Pub, 3rd ed edition, 2001.

⁵ James D. Rancourt. Optical thin films : user handbook. SPIE PRESS Monograph Vol. PM37. SPIE Optical Engineering Press, illustrated edition edition, 1996.

^{*} Electronic address: m.torresr@buniandes.edu.co

¹ Luciana C. Alves Alvarenga, Carla T. Coelho, Jaqueline S. P. M. Corrêa, Thiago Menegotto, Thiago Ferreira da Silva, Muriel Aparecida de Souza, Elisama Melo da Silva, Maurício Simões de Lima, and Ana Paula Dornelles de. Characterisation of optical filters for broadband uva radiometer. *Journal of Physics: Conference Series*, 733(1):012062, 2016.

⁴ S. A. Pollack. Angular dependence of transmission characteristics of interference filters and application to a tunable fluorometer. Appl. Opt., 5(11):1749-1756, Nov 1966.