

Alineación de un interferómetro Mach-Zehnder utilizando un espectrómetro

Proyecto final
Laboratorio Avanzado

Diego Alberto Castro* y Victor Giraldo Buesaquillo Gómez**
*Departamento de Física,
Universidad de los Andes. Bogotá-Colombia*

Omar Calderón Losada
*Estudiante de Doctorado
Universidad de los Andes*

Alejandra Valencia Gonzáles
*Profesora
Universidad de los Andes*

(24 de noviembre de 2015)

Resumen

En el presente trabajo se describe como alinear un interferómetro Mach-Zehnder usando una fuente de luz láser de 780 nm . En esta parte se alcanza patrones de interferencia temporal con una visibilidad del 90 %. Luego se implementa una técnica con un espectrómetro y se logra que las longitudes de los brazos del interferómetro solo difieran en el orden de los $10\ \mu\text{m}$. El objetivo principal era llegar a una diferencia inferior a $60\ \mu\text{m}$ y el resultado obtenido es el que se esperaba obtener.

I. INTRODUCCIÓN

Aprovechando las propiedades ondulatorias de la luz es posible construir diferentes tipos de interferómetros que conducen a gran número de soluciones tecnológicas, en particular trabajamos con el interferómetro Mach-Zehnder cuya configuración fundamental se explica brevemente en la sección II.

En ciertos experimentos de superposición cuántica se hacen pasar “fotones correlacionados” por un interferómetro Mach-Zehnder, el cual requiere un buen método de alineación [1, 2]. Un ejemplo es el laboratorio de óptica cuántica donde se deben utilizar dos interferómetros acoplados y alineados lo mejor posible. Para esto se realiza una metodología que consiste en ubicar los distintos elementos del interferómetro tal como se explica en la sección III. Además es necesario que los brazos del interferómetro tengan longitudes que solo pueden diferir en una cantidad inferior a los $60\ \mu\text{m}$ y para ello se emplea una técnica con un espectrómetro explicada en la sección III.

II. INTERFERÓMETRO MACH-ZEHNDER

Un interferómetro Mach-Zehnder consta de dos espejos altamente reflectivos y dos divisores de haz que en conjunto dividen un rayo de luz en dos para luego ser recombinados y observar patrones de interferencia dependiendo de la diferencia de camino de dichos haces. En la Figura 1 hay un esquema de dicho montaje.

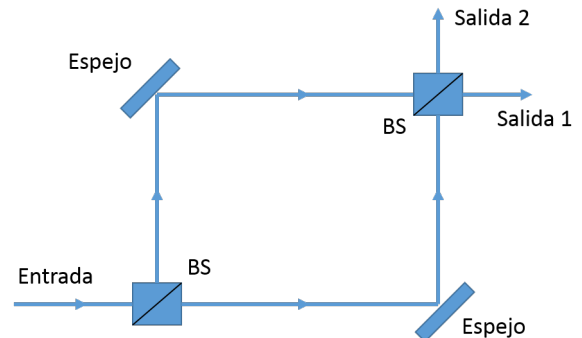


Figura 1: Esquema clásico del interferómetro Mach-Zehnder. A la entrada el haz incidente es dividido en dos en la interfaz del primer divisor de haz. Luego los haces son enfocados en el mismo punto del segundo divisor de haz.

*da.castrom@uniandes.edu.co

**vg.buesaquillo@uniandes.edu.co

Al tratarse de un aparato altamente configurable, flexible y sensible; el interferómetro Mach-Zehnder es utilizado en múltiples ámbitos, que van desde la aerodinámica, pasando por la física del plasma, transferencia de calor, medidas de presión, densidad, etc [3, 4]. Sin embargo, esta gran configurabilidad y flexibilidad trae dificultades a la hora de realizar la alineación y calibración deseada.

A. Interferencia con láser

Los haces que salen del interferómetro tienen intensidades I_1 e I_2 y cuando se encuentran en la interfaz del divisor de haz se suman mediante la siguiente expresión:

$$I_T = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\delta), \quad (1)$$

donde δ es la diferencia de fase de los mismos. Hay interferencia constructiva cuando δ es un múltiplo de 2π y destructiva cuando δ es un múltiplo de π .

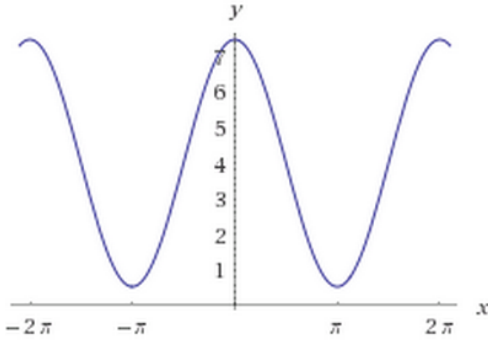


Figura 2: Para $\delta = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi, \dots$, hay interferencia constructiva y para $\delta = \pm\pi, \pm 3\pi, \dots$, hay interferencia destructiva.

Para obtener una medida de la calidad de la interferencia obtenida se define una cantidad denominada visibilidad (V) como se expresa en la ecuación:

$$V = \frac{I_{\text{máx}} - I_{\text{mín}}}{I_{\text{máx}} + I_{\text{mín}}}, \quad (2)$$

donde $I_{\text{máx}}$ es la intensidad máxima obtenida al variar ligeramente la diferencia de caminos a través del espejo que se encuentra sobre el piezoelectrico y $I_{\text{mín}}$ es la intensidad mínima [1, 2].

B. Interferencia con fuente de luz blanca

El desarrollo matemático que aparece a continuación es propuesto en [5] y verificado experimentalmente en [6]. La fuente de luz blanca se representa por la función $\tilde{E}_{in}(\omega)$ y cuando incide en el divisor de polarización, el cual tiene

transmitancia t y reflectancia r , se obtienen los dos haces que se representan por las siguientes ecuaciones,

$$\tilde{E}_1(\omega) = r \exp(ikL_1) \tilde{E}_{in}(\omega), \quad (3)$$

y

$$\tilde{E}_2(\omega) = t \exp(ikL_2) \tilde{E}_{in}(\omega), \quad (4)$$

donde L_i ($i = 1, 2$) es la longitud de los caminos recorridos por los haces en el interferómetro. Si el divisor de haz es no absorbente entonces se cumple:

$$|r|^2 + |t|^2 = 1 \text{ y } r^*t + rt^* = 0. \quad (5)$$

Cuando los dos rayos se encuentran en el segundo divisor de haz el ensamble resultante es:

$$\tilde{E}_3(\omega) = a(\omega) \tilde{E}_1(\omega) + b(\omega) \tilde{E}_2(\omega), \quad (6)$$

donde los coeficientes $a(\omega)$ y $b(\omega)$ se definen como sigue,

$$a(\omega) = rr' \exp(ikL_1) + tt' \exp(ikL_2), \quad (7)$$

y

$$b(\omega) = tr' \exp(ikL_1) + rt' \exp(ikL_2). \quad (8)$$

No obstante, en este experimento se mide la intensidad del haz ($I(\omega)$), que se define a continuación,

$$I(\omega) = \langle \tilde{E}_3^*(\omega) \tilde{E}_3(\omega) \rangle, \quad (9)$$

asumiendo que la intensidad en los dos rayos es la misma ($I_1(\omega) = I_2(\omega) = I_0(\omega)$) y haciendo los reemplazos correspondientes se obtiene

$$I(\omega) = I_0(\omega) \{1 + Re[a * b \mu_{12}(\omega)]\}, \quad (10)$$

con $\mu_{12}(\omega) = |\mu_{12}(\omega)| \exp[i\beta_{12}(\omega)]$, que es el grado de coherencia espectral compleja de los dos rayos. Asumiendo que la configuración es tal que $|r| = |r'| = |t| = |t'| = 1/\sqrt{2}$ se obtiene que $a * b = -(1/2) \sin(k\Delta)$, con $\Delta = L_2 - L_1$ y por ende,

$$I(\omega) = I_0(\omega) \{1 + Re[\mu_{12}(\omega)] \sin(k\Delta)\}. \quad (11)$$

La fuente de luz que se usa en este experimento tiene un perfil gaussiano dado por la siguiente expresión,

$$I_0(\omega) = I_0 \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{\sigma^2}\right], \quad (12)$$

siendo σ el ancho de banda del espectro, I_0 es una constante positiva y el grado de correlación de los dos rayos es

$$I_0(\omega) \mu_{12}(\omega) = I_0 \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{\eta^2}\right] \exp(i\varphi), \quad (13)$$

donde φ es una constante y η es una constante positiva que surge del grado de correlación de los rayos tal que

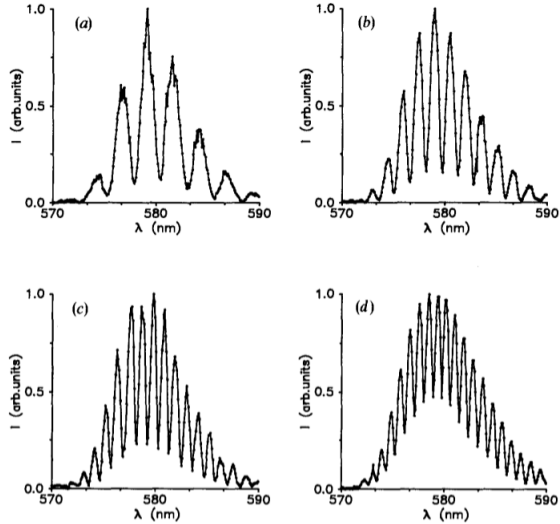


Figura 3: En esta gráfica se observa como a medida que la diferencia de caminos aumenta las modulaciones incrementan su frecuencia.

$\eta \leq \sigma$. Si por brevedad se asume que $\omega_0 \Delta / c = 2\pi n$, con n entero entonces resulta

$$I(\omega) = I_0 \left\{ \exp(-x^2) - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\eta} \right)^2 x^2 \right] \sin \left(\frac{\sigma \Delta}{c} x \right) \right\}. \quad (14)$$

En la Figura 3 se observan distintas gráficas de la ecuación (14) donde a medida que la diferencia de caminos aumenta las modulaciones incrementan su frecuencia. Se observa que el término que modula el perfil es la función $\sin \left(\frac{\sigma \Delta}{c} x \right)$ y es tal que si $\frac{\sigma \Delta}{c} \gg 1$ hay modulaciones, si $\frac{\sigma \Delta}{c} = 1$ las modulaciones no son significativas y si $\frac{\sigma \Delta}{c} \rightarrow 0$ no hay modulaciones. Debido a esto se puede suponer que cuando no se observen modulaciones en el perfil la diferencia de caminos es la mínima posible [5–7].

III. MONTAJE EXPERIMENTAL

En este trabajo se logra que el interferómetro Mach-Zehnder tenga una diferencia de caminos del orden de $10 \mu m$. Para alinear el interferómetro a tan alta tolerancia se usa una adecuada metodología. Se ubica cada uno de los elementos uno por uno en la posición adecuada utilizando un láser de $780 \mu m$. Además, se coloca unos filtros antes de las fibras para que determinen el ancho de banda de la luz. Puesto que el filtro tiene un $\Delta \lambda = 10 nm$, si se quiere tener franjas de interferencia, se necesita que la diferencia en longitud de los brazos sea menor que la longitud de coherencia de la luz, dada por $l_c = \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda} \approx 60 \mu m$, donde $\lambda = 800 nm$. Una diferencia de caminos ideal es de alrededor de $10 \mu m$.

En la Figura 4 aparece el esquema del montaje empleado, donde el haz incidente es polarizado por P en

dirección vertical y dirigido a una lámina de media onda que polariza el haz en un ángulo de 45° , de tal manera que en el PBS es dividido en dos rayos con igual intensidad, uno con polarización vertical y otro con polarización horizontal. Se coloca una segunda lámina de media onda en frente del haz con polarización horizontal para que lo rote a una polarización vertical y en el otro camino se coloca otra lámina a 0° con lo que se garantiza que los dos haces atraviesen los mismos elementos ópticos y los resultados no se vean alterados.

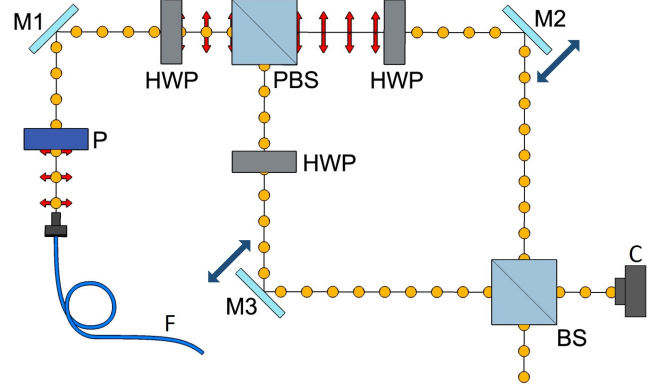


Figura 4: Esquema del interferómetro Mach-Zehnder empleado. M1, M2 y M3 son los espejos; HWP son las láminas de onda medios; P es un polarizador, PBS es un divisor de polarización, BS es un divisor de haz, F representa una fibra óptica y C representa una cámara o un espectrometro según se requiera. M1 se mueve manualmente y M2 se controla usando ordenador.

Durante el proceso de alineación se observa que el tablero en la parte superior de la mesa es susceptible de vibraciones que modifican los caminos, así que se necesita que el interferómetro esté lo más rígido posible. Para lograr esto es bueno tener una base suficientemente robusta y una montura de pedestal gruesa que sea muy rígida para prevenir vibraciones a pequeña escala, que puedan sufrir las monturas. También es útil colocar los diferentes elementos del interferómetro lo más cercanos posible. Para mejorar los patrones de interferencia se coloca un polarizador en frente del interferómetro que permite observar un contraste más grande entre la interferencia constructiva y destructiva.

Para alinear el interferómetro se verifica que los dos haces se encuentren en el mismo plano y sean perpendiculares, esto se hace utilizando como puntos de referencia diferentes iris calibrados previamente a una misma altura. Posteriormente se corrige la orientación y posición del segundo divisor de haz con ayuda de una cámara CCD ubicada a diferentes distancias, de tal manera que para cualquier distancia los dos haces se observen en el mismo punto. Algunos de los problemas en la orientación del divisor de haz se ilustran en la Figura 5.

El último paso consiste en lograr que los dos caminos tengan la misma longitud. Esto se hace reemplazando la luz láser por luz blanca, proveniente de una lámpara in-

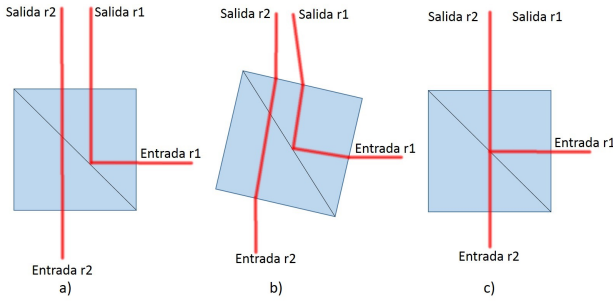


Figura 5: Problemas en la orientación del divisor de haz. En a) se observa un error en la posición en el plano horizontal. En b) hay un error con la orientación en el eje perpendicular al plano horizontal. En c) se muestra la posición y orientación correcta.

candesciente. La luz utilizada tiene todas las longitudes de onda en el rango visible y al pasar por los dos brazos del interferómetro, debido a la diferencia de longitudes, para algunas longitudes de onda habrá interferencia constructiva y para otras longitudes de onda habrá interferencia destructiva. Al mover el micrómetro que soporta uno de los espejos (M3) se observa que la modulación en el espectro cambia. En este caso los rayos están interfiriendo constructivamente para algunas longitudes de onda y destructivamente para otras. La interferencia depende de las longitudes de los brazos, lo que permite determinar cuándo la diferencia de caminos es óptima [2].

IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Una vez realizadas todas las correcciones en la orientación espacial del divisor de haz y las alturas de los rayos incidentes sobre este, es posible hacer una medida para cuantificar la calidad de la interferencia obtenida usando la ecuación (2), con lo que se obtienen los resultados de la Tabla I. Se observa que cuando se coloca un divisor de haz (BS) a la salida del interferómetro se logra incrementar la visibilidad de 0.51 a 0.74, sin embargo, no se alcanza una visibilidad de 0.9, que es lo que se obtiene cuando se tiene un divisor de polarización a la salida (PBS). Se cree que esto se debe a algún inconveniente con el divisor de haz empleado, no obstante, no se verifica esta hipótesis empleando un divisor de haz distinto por cuestiones de tiempo. Aún así se logra mejorar la visibilidad y a futuro habría que verificar dicha hipótesis.

Luego de realizada la alineación gruesa se procede a implementar la técnica de Enrique J. Galvez en la que se usa una fuente de luz blanca cuyo espectro se puede observar en la Figura 6, donde se muestra además un ajuste gaussiano al espectro obtenido y se corrobora la validez de modelar este espectro con este tipo de funciones. Inicialmente no se logra observar el fenómeno porque se hacía incidir la luz luego del polarizador, dado que este permite que haya correlación entre los

	a) BS			b) PBS		c) BS		
#	1	2	3	4	5	6	7	8
$I_{max}(\mu W)$	225	25	73	215	220	244	250	244
$I_{min}(\mu W)$	75	8	29	22	12	47	60	37
V	0.50	0.51	0.43	0.81	0.90	0.68	0.61	0.74

Tabla I: En a) se encuentran los datos de visibilidad usando el divisor de haz (BS) a la salida sin realizar correcciones a la orientación de las láminas de onda. En b) se muestran los resultados de visibilidad usando un divisor de polarización (PBS) usado para corregir la orientación de las láminas de onda medios. En c) se indican los resultados de la visibilidad con el BS posterior a las correcciones en la orientación de la polarización.

haces. Posteriormente aparece otro problema debido a un recubrimiento que tienen los espejos altamente reflectivos que introduce una modulación constante en el espectro, por lo que es necesario cambiar los espejos por espejos de aluminio. Solucionados dichos inconvenientes se obtienen los resultados esperados.

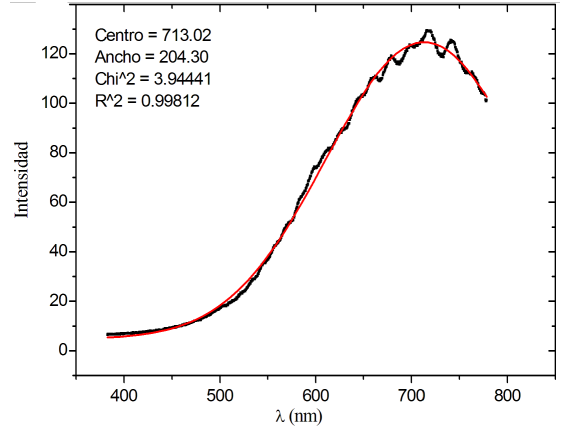


Figura 6: La gráfica ilustra el resultado de hacer un ajuste gaussiano del espectro de luz incidente y se observa que hay una correlación alta.

Al hacer que esta luz pase a través del Mach-Zehnder se obtiene el mismo espectro de la Figura 6 pero con las características adicionales que se explican en la sección II B.

Como se observa en la Figura 7, las modulaciones decrecen a medida que la diferencia de camino se hace menor hasta el punto de desaparecer cuando la diferencia de caminos es mínima.

Los resultados en la Figura 7 están descritos adecuadamente por la ecuación (14). Dado que la precisión del instrumento que varía la diferencia de caminos es de $10 \mu m$, sabemos que la diferencia de caminos está en torno a esta cantidad. Se observó entonces el mismo comportamiento descrito en [1].

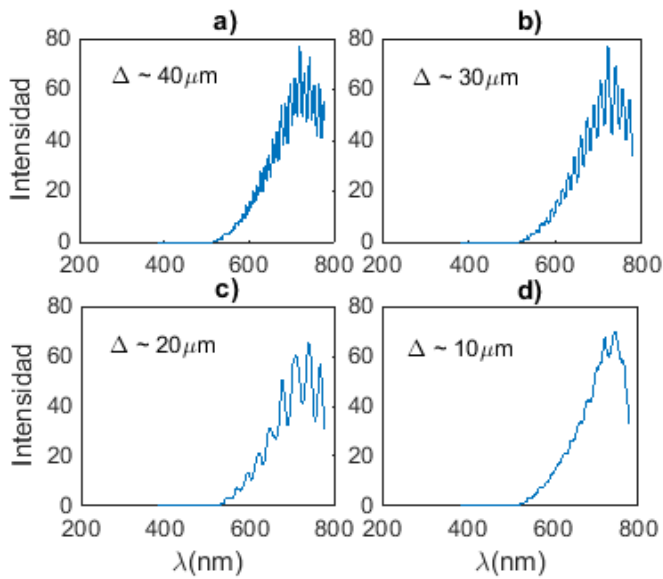


Figura 7: La gráfica indica los perfiles del espectro de la luz a medida que la diferencia de caminos decrece.

V. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

- Al alinear el interferómetro se observa interferencia temporal en el detector con una visibilidad de 90 % cuando se usa un divisor de polarización a la salida.
- Si se usa un divisor de haz $r/t = 50/50$ a la salida se obtiene una visibilidad de 74 %. La reducción en la visibilidad puede deberse a que en realidad en el divisor $r \neq t$.
- Gracias a la técnica empleada se obtiene una diferencia de camino óptico del orden de los 10 micrómetros, tal como era requerido.
- Futuro: Utilizar una fuente de fotones individuales y observar la interferencia.

-
- [1] E. J. Galvez, *How to set up single-photon interference experiments*, www.youtube.com/watch?v=_SRe5W3YoQ8&feature=youtu.be (2013), [Online; accessed 19-Sep-2015].
- [2] E. Galvez, C. H. Holbrow, M. Pysher, J. Martin, N. Courtemanche, L. Heilig, and J. Spencer, *American Journal of Physics* **73**, 127 (2005).
- [3] R. Mehra and J. Tripathi, *International Journal of Computer Applications* **1**, 110 (2010).
- [4] R. R. Bommarreddi, *Technologies* **2**, 54 (2014).
- [5] G. S. Agarwal and D. F. James, *Journal of Modern Optics* **40**, 1431 (1993).
- [6] D. N. Rao and V. N. Kumar, *Applied optics* **38**, 2014 (1999).
- [7] D. N. Rao and V. N. Kumar, *Journal of Modern Optics* **41**, 1757 (1994).