

Estabilización en frecuencia de láseres

Martín Drechsler

Muchas aplicaciones en física experimental necesitan de láseres cuya frecuencia, y por lo tanto su longitud de onda, se mantengan estables. Los interferómetros de ondas gravitacionales como *LIGO* y los experimentos con átomos ultra-fríos son ejemplos extremos en donde la estabilidad en frecuencia de los láseres utilizados resulta crucial.

Medición de frecuencia, ancho de banda y deriva. Es importante entender la conexión entre estos tres conceptos. Si se mide el espectro de un láser (es decir su frecuencia), esta medición ocurre durante un cierto intervalo temporal. Procesos que influyen la frecuencia del láser dentro de ese intervalo de tiempo resultan en agrandar el ancho de banda, mientras que procesos más lentos que la medición generan una deriva en el valor obtenido entre distintas mediciones. La escala temporal de los posibles ruidos que puede tener la frecuencia de un láser se encuentran entre los microsegundos y segundos. Típicamente los procesos rápidos que generan un incremento del ancho de banda son ruido láser en la corriente del láser o vibraciones. Cambios de temperatura o presión del aire, en cambio, suelen generar derivas.

Lazos de control y posibles referencias de frecuencia. El procedimiento habitual para estabilizar una variable es la de establecer un lazo de control: se sensa la variable a estabilizar (en este caso frecuencia) utilizando una referencia, y en base a eso se corrige el valor. Para un láser, existen dos tipos de referencias de frecuencia que se utilizan habitualmente: líneas atómicas o cavidades Fabry-Perot. Las referencias atómicas son excelentes como estándares de tiempo o frecuencia por ser absolutas ya que siempre¹ tienen el mismo valor. En los resonadores ópticos Fabry-Perot, en cambio, la frecuencia de resonancia es directamente proporcional al largo de la cavidad, lo cuál no permite tener una referencia absoluta pero sí otorga la ventaja de poder elegir el valor al cuál se quiere estabilizar la frecuencia del láser. Otras ventajas de utilizar resonadores ópticos en vez de líneas atómicas como referencia son que la corrección de frecuencia puede hacerse muy rápidamente, y su implementación práctica es más sencilla.

Estabilización utilizando un resonador óptico Fabry-Perot. Esta técnica consiste en mantener al láser siempre en resonancia con una cavidad de este tipo. Se necesita para eso construir un lazo de control, el cuál necesita de una *señal error*: esto es una señal que nos indique si la frecuencia del láser se corre de la resonancia de la cavidad. Luego en base a esa señal, se corrige la frecuencia actuando sobre el láser. Para lograr general esta señal error, la mejor forma es modular la frecuencia del láser que se envía a la cavidad, luego medir con un fotodetector la luz reflejada, mezclar la señal resultante con la señal moduladora y quedarse con la componente de continua de la señal. Esta técnica se conoce como *Pound-Drever-Hall* y tiene la ventaja de que es insensible a muchos tipos de ruido, no está limitada por el ancho de banda de la cavidad, y su implementación es relativamente sencilla en términos instrumentales. Las formas de modular el láser, y corregir su frecuencia, dependen fuertemente del tipo de láser que se utilice. Por ejemplo, en láseres de diodo semiconductor, el control de frecuencia y la modulación se realizan actuando sobre la corriente de alimentación del diodo.

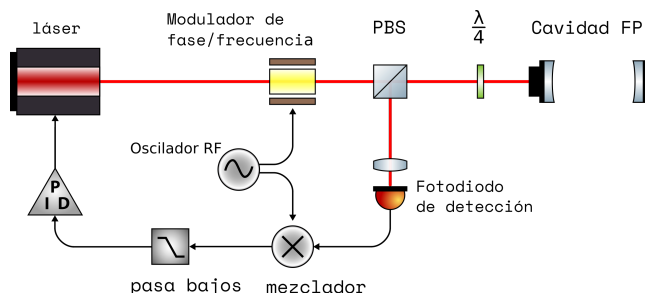


Figura 1: Esquema de implementación de la técnica de estabilización de Pound-Drever-Hall.

¹por supuesto que existen algunos efectos que pueden alterar su valor, pero en muchísima menor medida que cualquier otra referencia posible

Referencias

- [1] Riehle, F. (2006). Frequency standards: basics and applications. John Wiley & Sons.
Muy buen libro sobre estándares de frecuencia. En el capítulo 3 se discute en detalle como caracterizar el ruido en frecuencia que puede tener un láser.
- [2] Black, E. D. (2001). An introduction to Pound–Drever–Hall laser frequency stabilization. American journal of physics, 69(1), 79-87.
Artículo donde se explica con mucha claridad la técnica de Pound-Drever-Hall.
- [3] Drever, R. W. P., Hall, J. L., Kowalski, F. V., Hough, J., Ford, G. M., Munley, A. J., & Ward, H. (1983). Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator. Applied Physics B, 31(2), 97-105.
Artículo original de la propuesta de esta técnica.
- [4] Kessler, T., Hagemann, C., Grebing, C., Legero, T., Sterr, U., Riehle, F., ... & Ye, J. (2012). A sub-40-mHz-linewidth laser based on a silicon single-crystal optical cavity. Nature Photonics, 6(10), 687.
- [5] Matei, D. G., Legero, T., Häfner, S., Grebing, C., Weyrich, R., Zhang, W., ... & Sterr, U. (2017). 1.5 μm Lasers with Sub-10 mHz Linewidth. Physical review letters, 118(26), 263202.
Trabajos para ver el "estado del arte" de láseres estabilizados a cavidades.