

Un experimento simple para medir la velocidad de la luz

Thomas Haase* and Nicolas Esquivel†
Universidad de los Andes, Bogotá - Colombia

(Dated: 20, Mayo, 2010)

Este experimento busca proponer una forma simple de medir la velocidad de la luz sin necesidad de llevar acabo interferometría sino usando simples leyes de movimiento. Para esto se propone crear un láser pulsante el cual trabaja con un diodo láser y se pretende detectar la luz con un fotodiodo. Teniendo estos dos y usando un osciloscopio se pretende tomar los datos necesarios para medir la velocidad de la luz

I. INTRODUCCIÓN

Hasta hace un tiempo relativamente recientes la velocidad de la luz había sido sólo tema de conjeturas. Las primeras aproximaciones para conocer su velocidad usaron métodos bastante novedosos como el de Ole Romer (1644-1710) quien basandose en la diferencia temporal en la observación en la traslación de Ío una luna de Júpiter entre cuando la Tierra se encontraba cerca o lejos de ellos obtuvo resultados que si bien no fueron muy aproximados iniciaron una larga serie de intentos por medirla. Un experimento bastante conocido es el realizado por Michelson y Morley en 1887 el cual, pese a que intentaba comprobar la existencia de la sustancia hipotética llamada éter, constituyó la primera prueba de la inexistencia de este; lo resaltante de este experimento en cuanto a nuestro interés es que este mismo montaje experimental, ahora usando un rayo monocromático de frecuencia conocida, permite determinar la velocidad de la luz con bastante precisión al usar sus características de interferometría. Con estos resultados, al ser comparados con las ecuaciones de Maxwell para el caso particular de no flujo ni densidad de carga, se ha llegado a la conclusión de que la luz es radiación electromagnética.

Existen otras formas de medir la velocidad de la luz; un ejemplo claro es el usado en este experimento en el que se dispara un rayo láser pulsado y midiendo la intensidad a cierta distancia, algunos metros, del emisor y al observar el desfase de flancos de subida o bajada, es decir los tiempos que les lleva a las señales cambiar de encendido a apagado, entre el emisor y receptor se puede asociar al tiempo que toma a la luz llegar al segundo desde el primero.

II. MONTAJE EXPERIMENTAL

*Electronic address: ta.haase906@uniandes.edu.co

†Electronic address: n.esquivel22@uniandes.edu.co

Este experimento se basa en el artículo de la referencia 1. Para la realización de este se utilizó un diodo emisor láser para generar la señal luminosa a estudiar y un fotodiodo como receptor. Idealmente se busca generar una señal cuadrada, es decir una en que se alternen 0 V con un valor mayor a este y con tiempos de transición entre ellos insignificantes como se observa en la figura 1.



FIG. 1: Señal cuadrada deseada

El diodo emisor láser con número de referencia DL3147-060 fue importado desde ThorLabs en E.E.U.U. por recomendación del asistente del proyecto debido a no conocer empresas nacionales que comercialicen esta clase de elementos. La elección de esta referencia se debió principalmente a aspectos económicos y que cumplía los límites mínimos requeridos, pulsante y que la luz pudiera viajar la distancia requerida sin desvanecerse; algunas desventajas que tiene frente a otros observados es su baja potencia (5 mW de trabajo usual) y su relativamente bajo rango de voltajes de operación óptima (0.3 V) [?] Se observaría el comportamiento de los diodos, sus transiciones a lo largo del tiempo entre apagado (0 V) y encendido (>0 V), usando un osciloscopio de precisión, que aunque puede utilizarse uno estándar este facilita la observación y mejora la precisión de los datos de interés y se contaba con uno en el laboratorio. Basándose en el montaje presentado en el artículo guía, mostrado en las figuras 2 y 3, se buscó implementar cada etapa de este con circuitos hallados en las referencias 2 y 3 debido principalmente a lo poco claro de este en la generación

y las características de voltaje y frecuencia del pulso de reloj y además porque era claro cuál era el objetivo de este y existen diversas formas de lograrlo.

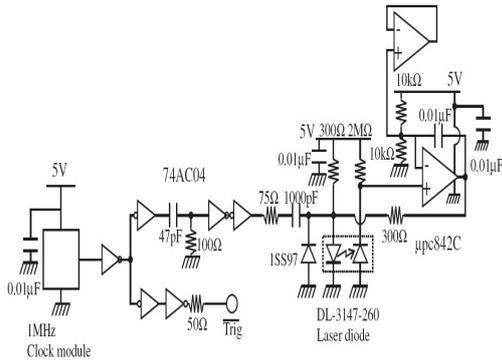


FIG. 2: Circuito mostrado en el artículo guía para el diodo emisor láser

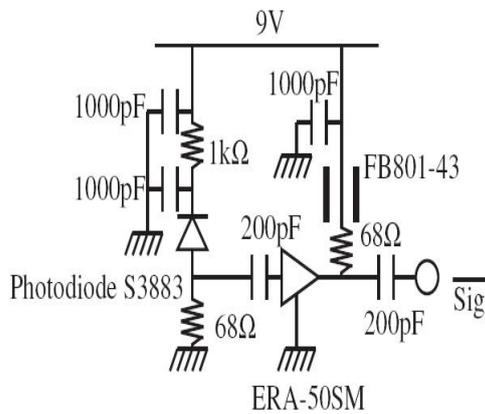


FIG. 3: Circuito mostrado en el artículo guía para el fotodiodo

Se requirió de una señal de entrada al diodo emisor que tuviera pulsos con flancos de subida y bajada con tiempos comparables con el tiempo que llevaría a la luz llegar al receptor (algunos nanosegundos), siendo esta una recomendación del artículo guía, ello para poder discriminar con mayor facilidad el desfase mencionado anteriormente. Debido a esta gran restricción de diseño se analizaron varias opciones para la generación de la seal de entrada al emisor:

El uso de un circuito oscilador con cristal de cuarzo: Con lo cual pudimos generar frecuencias bastante altas, del orden de MHz, lo cual implícitamente asegura tiempos de flanco menores, el esquemático se observa en la figura 4.

En la figura 5 se observa la señal obtenida con este oscilador la cual es bastante aproximada a la cuadrada buscada. Aunque luego al observar la respuesta del fotodiodo a los pulsos se detrimió que este se satura, es

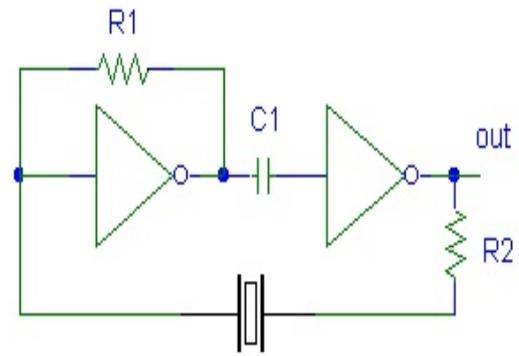


FIG. 4: Esquemático del oscilador con cristal de cuarzo

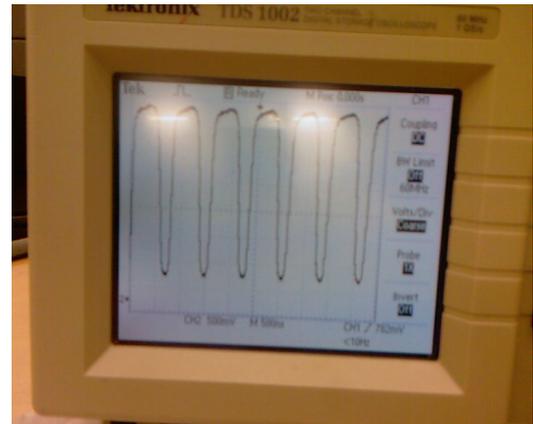


FIG. 5: Señal de salida del oscilador con cristal de cuarzo observada en el osciloscopio

decir el tiempo de descarga es mayor al que separa el fin de un pulso del inicio del siguiente y en el osciloscopio se observa un traslape de los pulsos, a una frecuencia mucho menores, lo cual convertía a esta opción en inviable.

El uso del circuito integrado LM555: El montaje usando este circuito integrado se observa en la figura 6:

El problema encontrado con este, pese a su amplio rango de frecuencias de operación, fue que el tiempo de flanco es de cientos de nanosegundos por lo que no nos permitía observar con claridad el desfase en los dedos. La señal observada en el osciloscopio corresponde a la de mayor tamaño en la figura 9.

La generación de la señal a partir de una configuración de transistores: Obtuvimos problemas similares a los de LM555 con tiempos de flancos muy grandes, y además obtuvimos voltajes bastante inestables. Su circuito esquemático se observa en la figura 7 y la señal generada en la figura 8

La principal restricción del diodo emisor es la de voltaje de operación, siendo su rango de operación desde 2.3 a 2.6 V, para lo cual necesitamos buscar distintas

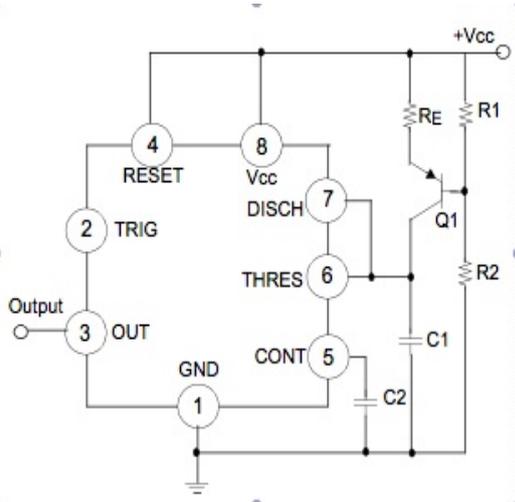


FIG. 6: Esquemático del oscilador con el LM555

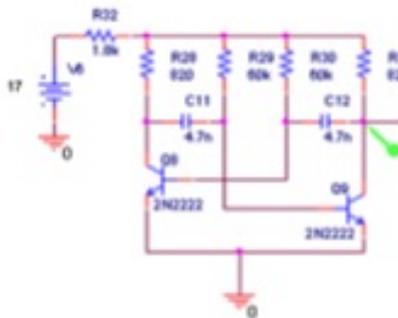


FIG. 7: Esquemático del oscilador usando transistores de unión bipolar

opciones ya que no se encontró un regulador comercial a 2.5 V.

Intentamos el uso de un diodo zener como regulador, pero debido a su funcionamiento no lineal a voltajes pequeños, cuando la señal desciende a 0 V, distorsionaba en gran forma la señal cuadrada; este problema se observa en la figura 8, en donde la señal de más grande corresponde a la salida del circuito oscilador usando un LM555 y la pequeña a la misma señal después del paso por el zener como regulador.

Luego utilizamos un divisor de voltaje con resistencias pero al igual que con el zener se distorsionaba bastante la señal sin importar los valores de resistencia utilizados. Además intentamos usando amplificadores operacionales obteniendo el mismo resultado que el anterior. Después de todos los problemas encontrados en la generación de la señal de entrada del diodo laser se optó por usar un generador de señales para conseguir una con tiempos de flanco comparables con el desfase que se intenta observar

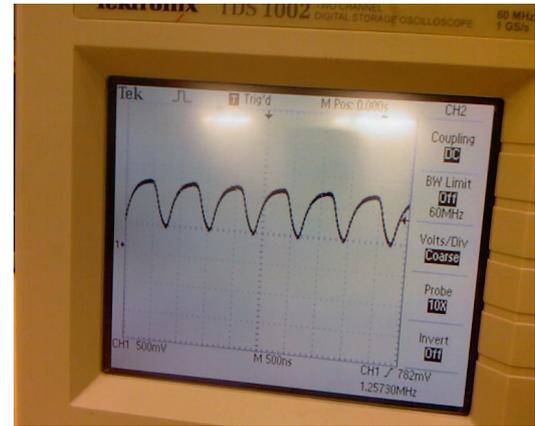


FIG. 8: Señal generada por oscilador usando transistores de unión bipolar



FIG. 9: Señal observada en el osciloscopio al usar un LM555 como circuito oscilador y zener como regulador

y con un voltaje pico a pico de 2.5 V.

El fotodiodo se debe conectar en serie con una resistencia, escogimos 1 K Ω para evitar corrientes muy altas que pudieran afectar su funcionamiento. El funcionamiento del fotodiodo es básicamente el de generar un potencial al ser alcanzado por una fuente de luz, lo cual es la señal que se busca analizar.

Una vez montado el laser y el detector se pretende medir la velocidad de la luz como es mostrado en la figura 10.

Teniendo en cuenta que con el osciloscopio se puede medir un desfase de tiempo (t) y la distancia que la luz debió recorrer es $2L$ la velocidad de la luz se calcula con:

$$v = \frac{2L}{t} \quad (1)$$

C. Datos Iniciales

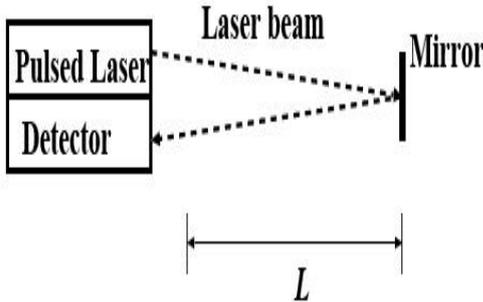


FIG. 10: Montaje experimental para medir la velocidad de la luz en donde la distancia que viaja la luz es de $2L$

III. RESULTADOS

En este espacio mencionaremos todos los inconvenientes que se encontraron al probar los circuitos.

A. Circuito Inicial Altas frecuencias 2MHz

El circuito inicial a altas frecuencias creado con el cristal de cuarzo falla en dos puntos.

Inicialmente el circuito tiene una señal de salida triangular. Pero la señal buscada es cuadrada, así que se requiere un derivador para cambiar la señal de triangular a cuadrada. El problema con esto es que un derivador con un amplificador operacional (OAMP) empieza a presentar fallas en la amplificación para frecuencias mayores a 100kHz.

Por otro lado encontramos que el circuito para el fotodiodo expuesto en el artículo no se puede recrear tan fácilmente y no tiene la señal deseada con el fotodiodo usado por nosotros. Esto nos forzó a usar un circuito más simple para el fotodiodo el cual tiene la respuesta deseada pero se satura a frecuencias bastante más bajas que las de operación de este oscilador como ya se ha mencionado.

Por estas razones no se pudo usar el circuito original.

B. Circuito baja frecuencia 100Hz

El problema del circuito de bajas frecuencias fue que ni el flanco de subida ni de bajada eran lo suficientemente corto para cumplir con el requerimiento ya mencionado de pocos nanosegundos, tenía una subida del orden de $1\mu s$. Por lo tanto no se pudo usar como generador de la señal para los diodos.

Al no poder encontrar un circuito que nos funcione apropiadamente llevamos acabo el experimento con un generador de ondas funcionando a bajas frecuencias, alrededor de los 10Hz, y con esto pudimos ver el láser pulsante.

Al tener parte del experimento completado también comenzamos a calibrar el láser y el fotodiodo y vimos inicialmente los tiempos de reacción de ambos componentes. Vimos que los tiempos de subida son de 5×10^{-9} segundos, pero este tiempo se ve más por la reacción de osciloscopio que por el circuito mismo. En este punto es un poco conveniente ver las señales con un osciloscopio de mayor precisión. La calibración inicial se llevó a cabo con un lente simple que se puede cuadrar su punto focal pero este tenía la falla de que cada vez que se cambiaba la distancia se lo debía cuadrar de nuevo. Para evitar esto se iba a emplear dos lentes biconvexas para tener un rayo de láser focalizado.

D. Por ley de Murphy

Una vez cuadrado todo y al comenzar a tomar los datos, al prender la alimentación al diodo láser este no reaccionó. Al observar mejor nos dimos cuenta que el diodo no estaba funcionando. Tomamos mediciones de todos los instrumentos utilizados y descubrimos que el generador de onda que estábamos usando no estaba generando señales perfectamente cuadradas, sino una que en todos los bordes, es decir de donde pasaba de 2.5 V a 0 V o biceversa, generaba un voltaje bastante más grande que el ideal, por lo tanto cambiamos de generador.

Por esta razón se habían comprado dos diodos emisores y se conectó el de repuesto. Este, lamentablemente, tampoco funcionó. Al dañarse ambos diodos láser, no se pudo continuar el experimento y dado el tiempo utilizado en cuadrar todos los circuitos no se disponía de más tiempo para tratar de arreglar los diodos o importar unos nuevos.

Las causas por las cuales creemos que se hayan dañado los diodos son:

1. Los diodos al ser de baja potencia tenían un rango de voltaje bajos de 2.3V a 2.6V y estábamos tratando de trabajar a 2.5V. Algún pico de los observados en el generador de señales pudo haber superado el límite de resistencia del diodo y terminado dañándolo.
2. El segundo diodo láser pudo haber sido dañado durante el transporte.
3. Osciloscopio que no estaba mostrando el voltaje que era.

IV. CONCLUSIONES

Nos pudimos dar cuenta que el experimento descrito en el artículo "a small tabletop experiment for a direct measurement of the speed of light" requiere mucho más análisis del mencionado por los autores y no es tan simple como ellos proponen.

El experimento requiere mayor presupuesto para tener mayor confiabilidad en los componentes electrónicos. Vemos que el laboratorio al que se compró los diodos láser tienen en catalogo diodos con potencia hasta 5 veces mayor por un precio mucho mayor. El diodo usado de referencia DL3147-060 tiene un precio de \$11.30 dólares por unidad y trabaja a 7mW como máximo. Si subimos un poco el presupuesto encontramos el diodo de referencia DL6147-040 con un costo de \$35.70 dólares que trabaja a 40mW. Trabajando a mayor potencia el diodo requiere mayor voltaje y al trabajar con voltajes mayores se puede tener mayor control de este. Igualmente podemos ver que con mayor presupuesto se puede comprar un fotodiodo con un mayor rango de frecuencias antes de observar el problema de saturación de forma que podamos incrementar la frecuencia sin afectar el correcto funcionamiento de este.

Otro aspecto del experimento que marcó su dificultad es la necesidad de manejar altas frecuencias. En altas frecuencias los tiempos de subida de los pulsos eléctricos son minimizados lo más posible así que el tiempo de subida es menor a la escala de tiempo (nm) que tarda la luz en ir y regresar, es decir salir del diodo emisor y llegar al fotodi-

odo. La frecuencia requerida para esto es del orden de los MHz y mantener la frecuencia en este orden era casi imposible porque la mayoría de los componentes electrónicos se satura a frecuencias de este orden de magnitud. Por ejemplo el amplificador operacional comienza a presentar fallas en su funcionamiento al alrededor de los 100kHz. Por lo tanto se requieren componentes electrónicos especializados en trabajar a frecuencias altas como el cuarzo utilizado en nuestro primer circuito o circuitos de tecnología CMOS de alta frecuencia de escasa presencia comercial.

Montando el experimento con el generador de ondas nos dimos cuenta que no se podía tomar datos a menos de 20Mhz o si no hay un desfase en el tiempo de subida que afectaría nuestros datos para la toma del tiempo que se demora la luz. Aparte de eso cuadrar el láser y enfocarlo en un punto es relativamente fácil usando dos lentes biconvexas.

Para mejorar el experimento se requiere un fotodiodo más sensible con bajo tiempo de descarga. Un diodo láser que tenga mayor potencia y rango operacional para tener más confiabilidad en su utilización. Aparte de esto es pertinente usar equipos de suministro y análisis de mayor precisión como por ejemplo los osciloscopios y generadores de onda encontrados en el laboratorio de electrónica digital del departamento de ingeniería electrónica de la universidad de los Andes.

-
- [1] Kenichiro Aoki, Takahisa Mitsui, A small tabletop experiment for a direct measurement of the speed of light, Keiko University, Yokohama, Japan, 1^{ro} Febrero de 2008.
 [2] Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith, MicroElectronic Circuits, Oxford, 5th eddition, 2009.

- [3] Charles Alexander, Matthew Sadiku, Fundamentals of Electric Circuits, McGraw-Hill, 3rd edition, 2006.
 [4] <http://www.thorlabs.com>.