

UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISION DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE FISICA

**“GENERACIÓN DE BURBUJAS DE CAVITACIÓN CON LÁSER
CONTINUO PARA LA FORMACIÓN DE MICROAGUJEROS EN
PELÍCULAS METÁLICAS DELGADAS”**

Tesis que para obtener el grado de
LICENCIADA EN FÍSICA

Presenta

SUSANA ALEJANDRA TORRES HURTADO

Hermosillo, Sonora

Octubre de 2010

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



“El saber de mis hijos
hará mi grandeza”



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Dedico esta tesis:

A ti Señor, por hacer realidad este sueño

y a mis Padres por todo su apoyo y por confiar en mí.

AGRADECIMIENTOS

"Un poco de ciencia aleja de Dios,pero mucha ciencia devuelve a Él."

- Louis Pasteur -

Primero que nada, agradezco a *Dios* por darme la fuerza para seguir adelante, por permitir que todo esto suceda y por poner en mi camino a personas tan especiales.

A mis padres *Manuel Torres Salazar* y *Francisca Hurtado Gil* por su comprensión, por sus palabras de aliento, por ser de mí la persona que soy y, aunque de lejos, por estar siempre conmigo. Gracias por ser los mejores maestros que he tenido en la vida, los quiero.

A mis hermanas *Karla María, Lilia Lucía, Ana Gabriela y Teresa Guadalupe*, por ser las mejores hermanas y amigas que una puede tener. Gracias por todos sus consejos, por su preocupación y por todos los maravillosos momentos.

A mis asesores de tesis *Dra. Adriana Erika Martínez Cantón* y *Dr. Rubén Ramos García* por sus conocimientos, sus asesorías, su motivación y orientación para que se pudiera realizar esta tesis. Gracias por guiarme por este camino, junto con el *Dr. Julio Ramírez San Juan* y al *C. Dr. Enrique Rodríguez Aboytes*.

A mis *profesores de la licenciatura* por su esfuerzo y dedicación, por aportar un granito de arena en mi formación; y a mis *compañeros de Física*, en especial a *Gibraham Ivanhoe Nápoles Cañedo, Gregorio Alejandro Vejar Delgado y Luis Fernando Mendivil Elías*, por no dejarme caer y por su compañía durante estos cuatro años.

A la *Universidad de Sonora* y al *Departamento de Física*, por darme la oportunidad de prepararme profesionalmente y por lo que invirtió en mí para sacarme adelante. Gracias por hacerme sentir orgullosamente búho.

Finalmente, y en especial, quiero agradecer a *Jorge Alberto López Coronado* por su amor, su paciencia y comprensión, por todo su apoyo y por estar siempre conmigo. Gracias por vivir conmigo este sueño.

Susana Alejandra Torres Hurtado

RESUMEN

"A mí me enseñaron en la escuela que nunca se debe empezar una frase
sin saber el final de la misma".

- Paul Dirac -

El objetivo de la presente tesis es la aplicación de una técnica alternativa para la formación de microagujeros en películas delgadas que posteriormente puedan ser utilizadas como fuentes puntuales de luz (del orden de micrómetros) o filtros espaciales.

Los métodos comúnmente empleados en la perforación de materiales utilizan láseres pulsados (de alto costo) o bien láseres de excitación continua de alta potencia. Este trabajo propone una técnica donde se usa un láser de emisión continua de baja potencia combinado con el uso de una solución altamente absorbente y la formación de burbujas conocida como cavitación.

La cavitación se define como la formación, crecimiento y posterior colapso (implosión) de burbujas de gas (cavidades) en el seno de un líquido, el cual produce ondas de choque y jets de agua capaces de producir daños sobre superficies. Esto se ha estudiado desde principios del siglo XX. En particular, la cavitación óptica es generada por la absorción de fotones incidentes en líquido comúnmente utilizando un láser pulsado. El presente trabajo obtiene la formación de burbujas de cavitación utilizando un nuevo mecanismo llamado termocavitación.

Para la perforación de las placas se utilizó un láser de emisión continua de 975nm de longitud de onda, enfocado en la solución altamente absorbente (nitrato de cobre), dicha solución se coloca entre la placa metálica que se quiere perforar y un cubreobjetos. Utilizando un generador de funciones, se puede controlar el láser para controlar el número de cavitaciones que se quieren producir.

Siguiendo este procedimiento se pudieron obtener una serie de agujeros de diferentes diámetros (del orden de micras) variando la potencia de láser, el número de cavitaciones o el tiempo de exposición del láser.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN *1*

I. MARCO TEÓRICO *5*

1.1 Cavitación *5*

1.2 Colapso de una burbuja *8*

1.3 Cavitación óptica *14*

1.3.1 Termocavitación *14*

1.4 Erosión por cavitación *18*

1.4.1 Aplicaciones en la formación de microagujeros *19*

II. DESARROLLO EXPERIMENTAL *20*

2.1 Películas metálicas delgadas *20*

2.2 Nitrato de Cobre *21*

2.2.1 Características *21*

2.2.2 Coeficiente de absorción *23*

2.3 Arreglo Experimental *25*

2.3.1 Análisis de la burbuja *25*

2.3.2 Generación de microagujeros *28*

III. RESULTADOS 31

3.1 Burbuja de cavitación 31

3.2 Microagujeros 37

3.2.1 Placa con película de titanio 37

3.2.2 Placa con película de aluminio 38

CONCLUSIONES 40

APÉNDICES 42

A. Derivación de la ecuación de Rayleigh-Plesset 42

B. Ecuación de la presión de la onda de choque 44

C. Absorbancia y Ley de Lambert-Beer 45

D. Especificaciones del instrumental utilizado 47

E. Póster 51

F. Cavitation induced by CW lasers in absorbing liquids 52

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 57

ÍNDICE DE ECUACIONES

- ECUACIÓN 1.1 Crecimiento y colapso de una burbuja cerca de una pared 9
- ECUACIÓN 1.2 Ecuación para el radio máximo de la burbuja 13
- ECUACIÓN 1.3 Ecuación para un gas ideal 15
- ECUACIÓN 1.4 Ecuación de conducción de calor 16
- ECUACIÓN 1.5 Presión de la onda de choque 18

ÍNDICE DE FIGURAS

- FIGURA 1.1 Dinámica de la burbuja de cavitación 6
- FIGURA 1.2 Tipos de cavitación 7-8
- FIGURA 1.3 Burbuja en un líquido irradiado con ultrasonido 9
- FIGURA 1.4 Colapso de una burbuja cerca de una pared 10
- FIGURA 1.5 Trayectorias de la partículas durante el crecimiento y el colapso 11
- FIGURA 1.6 Burbujas de cavitación en la vecindad de una frontera sólida 12
- FIGURA 1.7 Simulación en COMSOL 17
-
- FIGURA 2.1 Películas de aluminio y te titanio 21
- FIGURA 2.2 Estructura química del $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 22
- FIGURA 2.3 Fotografía del $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ en sal y en solución 22
- FIGURA 2.4 Arreglo para medir el coeficiente de absorción del $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 24
- FIGURA 2.5 Gráfica de absorción para la solución de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 24

FIGURA 2.6	Arreglo experimental para analizar a la burbuja de cavitación	26
FIGURA 2.7	Arreglo experimental para la generación de microagujeros	29
FIGURA 2.8	Fotografía del arreglo para la generación de microagujeros	30
FIGURA 3.1	Señal para varias cavitaciones en función del tiempo	32
FIGURA 3.2	Frecuencia de repetición en función de la potencia del láser	33
FIGURA 3.3	Señal para una cavitación en función del tiempo	34
FIGURA 3.4	Señal del hidrófono en función del tiempo	35
FIGURA 3.5	Presión de la onda de choque en función de la potencia del láser	35
FIGURA 3.6	Burbuja alrededor del colapso	36
FIGURA 3.7	Película de titanio con microagujeros generados con cavitación	37
FIGURA 3.8	Película de aluminio con agujeros creados con cavitación	38

INTRODUCCIÓN

"Si no te ha sorprendido nada extraño durante el día, es que no ha habido día."

- John Archibald -

La cavitación se define como la formación, crecimiento y posterior colapso (implosión) de burbujas de gas (cavidades) en el seno de un líquido. Según Lauterborn [1] el origen de la formación de burbujas de cavitación puede ser provocada por variación de presión (hidrodinámica y/o acústica) o por deposición de energía (óptica y/o partículas elementales –protón, ruptura del líquido, etc.).

Cuando se forma la burbuja, dentro de ella pueda haber gas, vapor o una combinación de ambos, la evolución de estos en el interior de una burbuja al variar su tamaño puede ser a temperatura constante, si el cambio es suficientemente lento para permitir el flujo necesario de calor burbuja-líquido o viceversa; si la variación de tamaño es rápida, se puede, suponer que el flujo de calor citado es despreciable, y la evolución de gas y vapor en la burbuja se denomina adiabática. Epstein y Plesset en 1950 [2] demostraron la importancia de los intercambios térmicos para la evolución de la burbuja. Durante la fase final del colapso de una burbuja se alcanzan velocidades, dirigidas hacia el centro de ella, de cientos de metros por segundo.

Cuando la presión interior de la burbuja crece hasta valores de miles de bar, el agua que rodea la burbuja, de una densidad mucho mayor que la que se encuentra en el interior de la burbuja, se desplaza siguiendo la interface con la

burbuja, cuando la burbuja alcanza su radio máximo, la presión en el interior de la burbuja es menor que la presión ejercida por el líquido que la rodea, generando el colapso de la burbuja, rompiendo la tensión superficial de las paredes de la burbuja. Cuando la presión de la burbuja es muy elevada, ésta tiende a frenar el líquido, para alcanzar velocidad nula cuando el radio es mínimo. Debido a la inercia superior del agua, ésta trata de seguir moviéndose hacia el centro y, al impedírsele, la burbuja genera presiones elevadas sobre la interfase, las cuales dan origen a ondas de presión que se propagan en el líquido a la velocidad del sonido (~ 1000 m/s en agua).

Históricamente la cavitación se asocia a connotaciones negativas debido a su relación con la reducción de eficiencia en máquinas y dispositivos hidráulicos, así como la erosión que puede ocasionar sobre superficies sólidas. A partir del siglo XVIII se empieza a estudiar el fenómeno de la cavitación, de hecho en 1895 se construye el primer túnel hidrodinámico para ensayos de cavitación. Hasta antes del siglo XX, el estudio de la cavitación se limitaba a conocer su formación y como poder evitar tanto la aparición del fenómeno como los daños provocados por el mismo. Es a principios del siglo XX que se empieza a estudiar la generación y colapso de burbujas para su aplicación en diversas áreas como lo son la medicina y la ingeniería [3]. En las últimas tres décadas la dinámica de la burbuja cercana a una superficie ha sido estudiada utilizando cámaras fotográficas ultrarrápidas (\sim ns) e hidrófonos de rápida respuesta.

En 1998, Lauterborn reportó dos efectos característicos como posibles responsables de la acción destructiva: (a) la emisión de ondas de choque después del

colapso de la burbuja y (b) la generación de un “jet” de agua que impacta directamente sobre la superficie a altas velocidades [1]. Un tercer efecto fue propuesto por Shutler alrededor de 1965 y comprobado posteriormente por Lauterborn: durante la fase del colapso, la burbuja es atraída cerca de la superficie sólida, reduciendo la distancia al momento del colapso, incrementando considerablemente el daño provocado por la onda del choque y que esto es principalmente el responsable del daño a las superficies.

Puede existir coalescencia de burbujas, es decir, que dos burbujas se unan para formar una sola, pero eso sólo ocurre cuando existen nubes de burbujas. En cavitación, si dos burbujas se unen antes de colapsar se obtendría una burbuja de radio mayor pero si se da durante el colapso cerca de una superficie, se tendrían dos zonas de impacto, lo cual ocurre cuando hay cambio de presión. Más adelante se abordará los tipos de cavitación, en cavitación óptica sólo se va generando una burbuja a la vez.

Por otro lado, en líquidos, la generación de burbujas utilizando láser es habitualmente el resultado de dos mecanismos diferentes: 1) absorción óptica seguida por excitación térmica, por ejemplo cavitación óptica ó 2) excitación no térmica, como en el caso de procesos fotoquímicos y de rompimiento óptico [4].

En el presente trabajo, se muestra la obtención de cavitación utilizando un láser infrarrojo de excitación continua y baja potencia enfocado sobre una muestra de solución absorbente, en particular soluciones de agua destilada con diferentes concentraciones de sal de nitrato de cobre. Existen estudios previos de cavitación

sobre soluciones absorbentes [5] y en este trabajo se utiliza una disolución de nitrato de cobre ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$) que alcanza la temperatura de descomposición produciendo gases de NO_2 , NO y HNO_3 además de vapor de agua [6,7] que facilita la generación de burbujas.

La tesis está formada por tres capítulos y conclusiones: Capítulo 1 Marco teórico, describe la dinámica de la burbuja de cavitación, incluye características sobre colapso y erosión por cavitación; Capítulo 2 Desarrollo Experimental, describe el arreglo experimental y las muestras utilizadas para obtener burbujas de cavitación y microagujeros en películas metálicas delgadas; Capítulo 3 Resultados, presenta los resultados obtenidos y al final se presentan las conclusiones y discusiones.

Se agregan unos apéndices sobre algunos modelos utilizados, se presentan las especificaciones de los equipos utilizados durante el desarrollo de los experimentos, también un poster presentado en el XIX Verano de la Investigación Científica de la Academia Mexicana de Ciencias, resultado de la estancia en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica con la Dra. Adriana Erika Martínez Cantón y por último se presenta un artículo de la SPIE, en el cual se colaboró.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

"Todo nuevo conocimiento esencialmente nuevo nos coloca de nuevo en la situación de Colón, que tuvo el valor de abandonar toda la tierra conocida hasta entonces."

- Werner Heisenberg -

El siguiente capítulo presenta una definición de cavitación y los tipos de cavitación el cual se enfoca en la cavitación óptica y la termocavitación. También se hace referencia al colapso de la burbuja y a la erosión que ocasiona al implotar en superficies cercanas. La cavitación tiene muchas aplicaciones en diferentes campos como en la medicina y en la ingeniería, por ejemplo para hologramas y rompimiento de membranas [8,9].

1.1 CAVITACIÓN

La palabra cavitación proviene del latín *cavus*, que significa cavidad y se refiere a la formación de burbujas compuestas por gases y/o vapores en fluidos. Más estrictamente puede ser definida como la ruptura del líquido, la cual da paso a la formación de burbujas de gas (cavidades) que crecen y posteriormente colapsan (implotan) a una velocidad mayor que la del sonido, emitiendo ondas de choque (ondas de presión abrupta) [10].

La figura 1.1 muestra la dinámica típica de formación y colapso de la burbuja obtenida en experimentos (detalles serán dados más adelante). Note que la velocidad de implosión es mayor que la velocidad de crecimiento de la burbuja, lo cual es característico en cavitación.

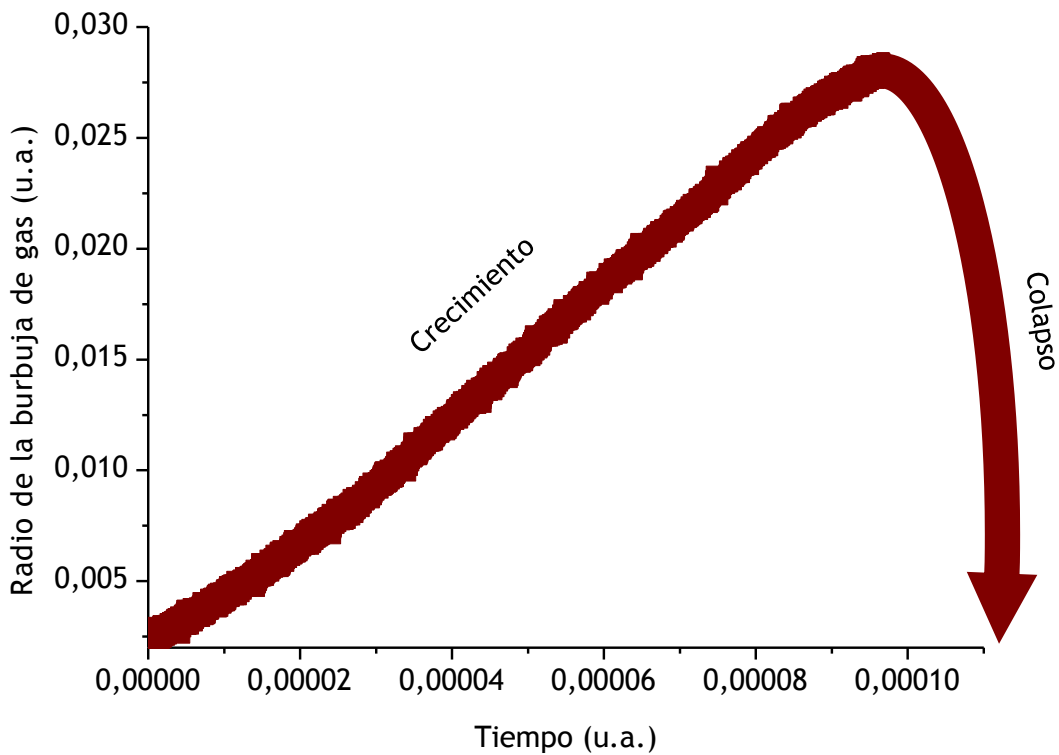


FIGURA 1.1 Dinámica de la burbuja de cavitación.

De acuerdo a como la cavitación es producida existen cuatro tipos [3]:

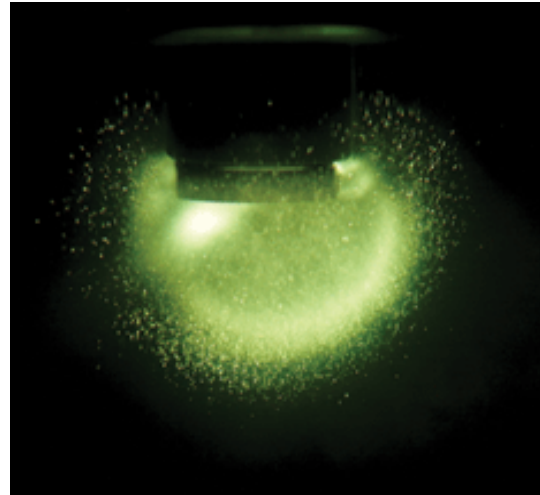
1. Cavitación hidrodinámica. Producida por las variaciones de velocidad del flujo del líquido debidas a la geometría del sistema.
2. Cavitación acústica. Debida a la propagación de ondas de presión en un líquido.

3. Cavitación óptica. Producida por fotones de luz de alta intensidad que atraviesan a un líquido.
4. Cavitación de partícula. Producida por cualquier tipo de partícula elemental (por ejemplo un protón) que provoca el rompimiento del líquido formando burbujas.

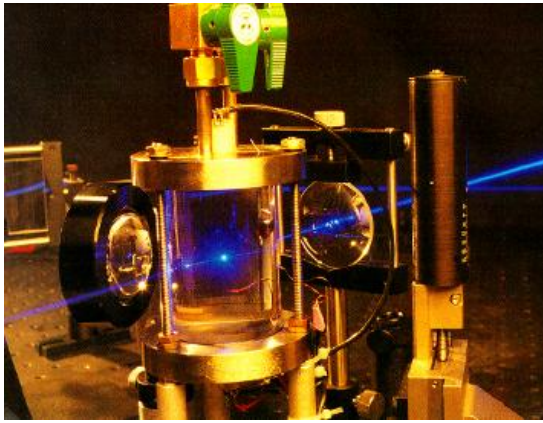
En la figura 1.2 se presentan fotografías de los 4 tipos de cavitación: (a) Muestra un túnel para crear cavitación hidrodinámica, donde al disminuir el diámetro del tubo, la velocidad del fluido aumenta provocando una disminución de presión, generando burbujas en la interfase; (b) nube de burbujas generada por cavitación acústica; (c) cavitación óptica obtenida enfocando láser pulsado azul (~ 408 nm) sobre un fluido y (d) cavitación de partículas.



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 1.2 Tipos de cavitación: (a) Cavitación hidrodinámica, (b) Cavitación acústica, (c) Cavitación óptica y (d) Cavitación producida por neutrones.

1.2 COLAPSO DE UNA BURBUJA

Existen dos tipos de colapso de una burbuja, cuando la burbuja se genera alejada de cualquier tipo de superficie ya sea blanda (membrana) o rígida (pared sólida) y la cavidad esférica permanece durante el colapso debido a que su entorno es uniforme. A este tipo de colapso se le llama simétrico en el cual se genera una onda de choque que se propaga en todas direcciones. Cuando se produce la cavitación en un líquido cerca de una superficie sólida, la dinámica del colapso de la cavidad cambia; cuando una burbuja implota cerca de una superficie, generalmente aparece el llamado colapso asimétrico, esto se debe, a que la superficie ofrece resistencia al flujo de líquido del lado de la pared y como resultado se da una irrupción del líquido generado principalmente por el lado de la burbuja que se encuentra alejada de la

superficie (ver figura 1.3) formando un chorro de líquido “micro-jet” de gran alcance que se dirige a la superficie sólida.



FIGURA 1.3 Burbuja en un líquido irradiado con ultrasonido implota cerca de una superficie sólida. La presencia de sólidos cerca de la implosión genera un colapso asimétrico, formando un chorro de alta velocidad del líquido que afecta a la superficie [11].

El crecimiento y colapso de una burbuja de vapor cerca de una pared depende de la distancia h a la cual se encuentra el centro de la burbuja respecto al substrato y el radio máximo R_{max} de la misma, es decir,

$$\gamma = \frac{h}{R_{max}} \quad (1.1)$$

En la figura 1.4 se muestran los resultados numéricos calculados por Plesset y Chapman (1971), los cuales muestran la dinámica de la implosión de una burbuja

cercana a una superficie sólida [10]. A representa la burbuja inicial (radio máximo) la burbuja al tiempo $t=0.63$ seg después de la creación de la burbuja; posteriores curvas muestran su evolución y su deformación conforme la burbuja se acerca al colapso. En la etapa final se da la formación de un microchorro de agua dirigido hacia el centro de la burbuja y como aumenta la velocidad del colapso hasta alcanzar ordenes de ~ 100 m/s, como se muestra en la tabla de la misma figura. En este caso la presión disminuye conforme aumenta el radio, es decir, son inversamente proporcionales.

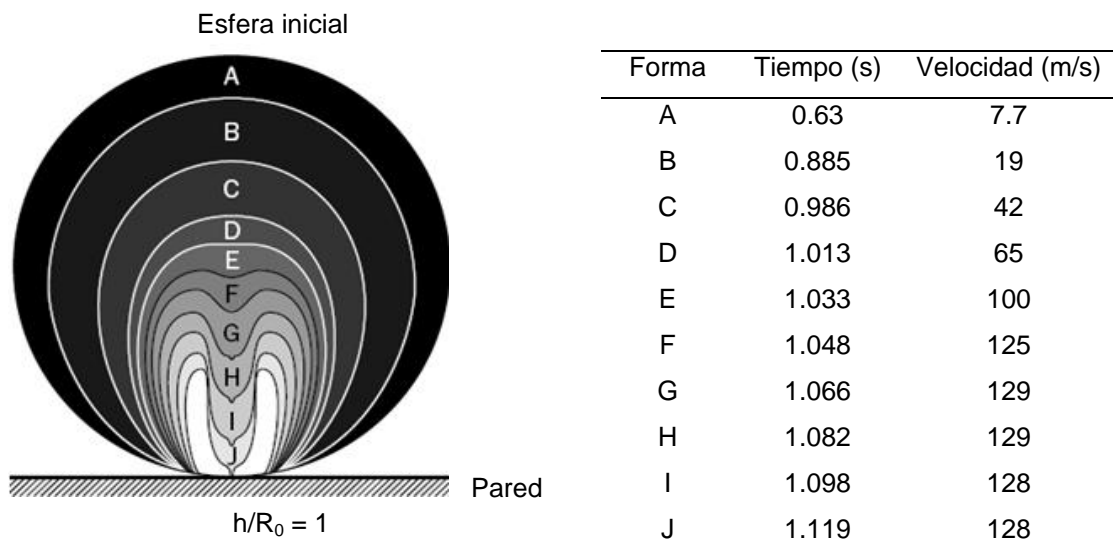


FIGURA 1.4 Colapso de una burbuja cerca de una pared.

Cuando la burbuja colapsa no necesariamente se va a destruir por completo, generalmente el colapso genera otra burbuja de mucho menor radio, la cual genera que se propague segunda onda, este comportamiento es más notorio en cavitación acústica. La figura 1.5 muestra las trayectorias (flechas) de la partículas durante el

crecimiento y el colapso (de Blake y Gibson, 1987 [10]), dicha trayectoria genera un jet hacia el centro de la burbuja formando una simetría parecida a un toroide.

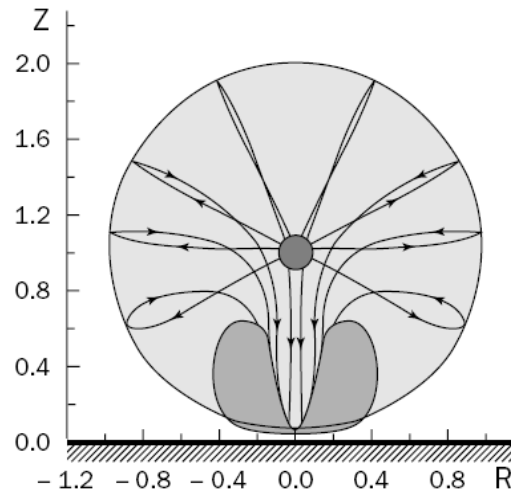


FIGURA 1.5 Trayectorias de la partículas durante el crecimiento y el colapso

Cuando la superficie cercana no es un sólido, sino una superficie libre (membrana) este jet se dirige a la superficie pero no necesariamente le va a causar un daño inmediato, sino que puede empujar esa superficie obteniendo un tiempo de oscilación prolongado, hasta que la logre perforar o se atenué la oscilación.

En la figura 1.6 se muestra fotografías donde se aprecia el comportamiento del crecimiento y colapso de las burbujas de cavitación cerca de una pared sólida a diferentes distancias entre la formación de la burbuja y la pared, donde el radio de la burbuja antes del colapso (R_{\max}) es de 1.45 mm [12]. Se observa que cuando la burbuja crece lejos de la pared su forma es más esférica que cuando se va acercando, ya que va obteniendo una forma semiesférica. En el colapso, cuando la burbuja se forma más lejos del substrato su forma es similar a una gota, mientras que más

cerca, como ya se mencionó, toma forma de toroide con un chorro de agua dirigida hacia el centro de la misma.

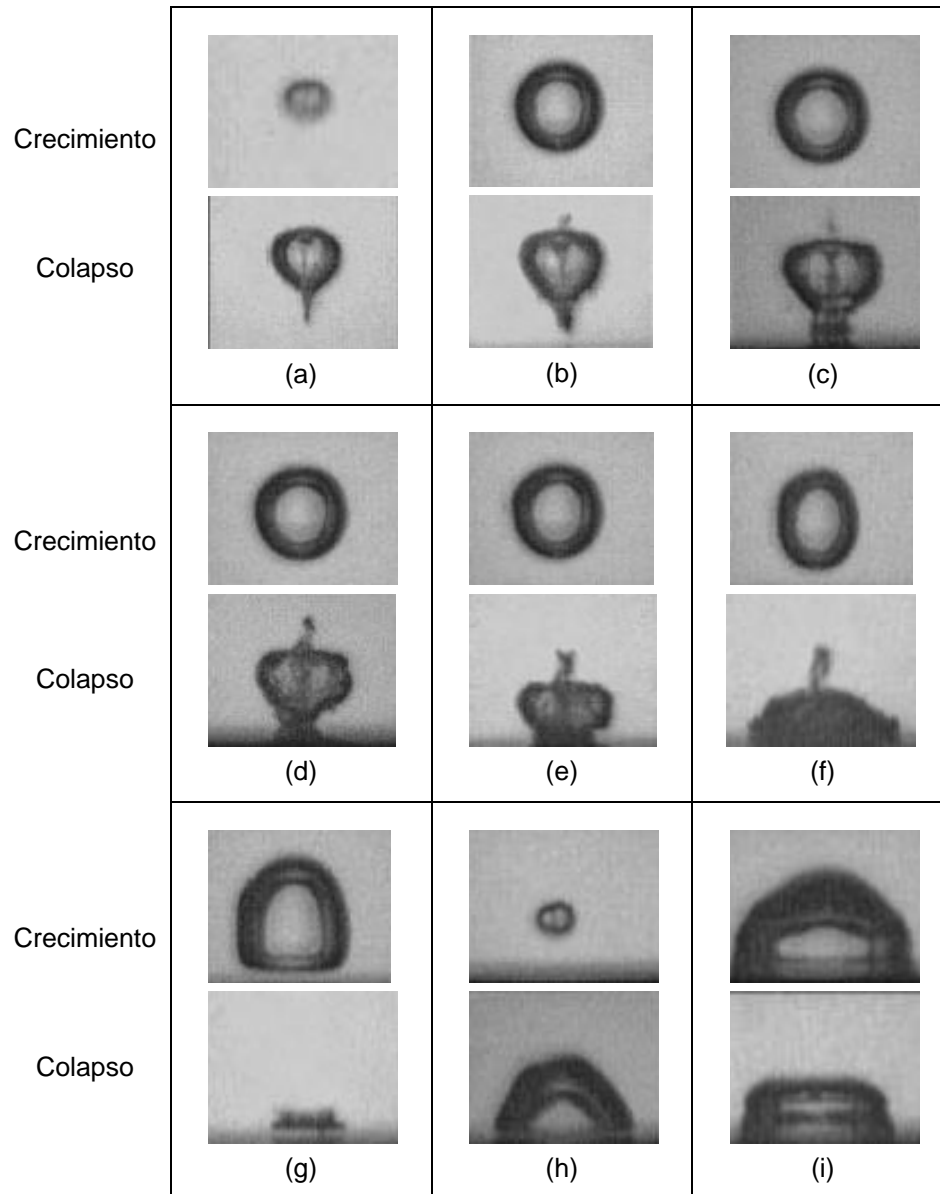


FIGURA 1.6 Burbujas de cavitación en la vecindad de una frontera sólida, a diferentes distancias entre la formación de la burbuja y la superficie (a) $h=4.35$ mm ($\gamma=3.0$), (b) $h=2.9$ mm ($\gamma=2.0$), (c) $h=2.61$ mm ($\gamma=1.8$), (d) $h=2.32$ mm ($\gamma=1.6$), (e) $h=2.03$ mm ($\gamma=1.4$), (f) $h=1.74$ mm ($\gamma=1.2$), (g) $h=1.305$ mm ($\gamma=0.9$), (h) $h=0.87$ mm ($\gamma=0.6$) e (i) $h=0.435$ mm ($\gamma=0.3$)

Otros aspectos que pueden afectar la formación, crecimiento y colapso de la burbuja [13] son la viscosidad, temperatura, densidad del líquido y tensión superficial. En particular, para la generación de cavitación acústica, Rayleigh* propuso la ecuación 1.2 para determinar el radio máximo de la burbuja tomando en cuenta los cambios de presión y la densidad del fluido:

$$R_{max} = \frac{T_c}{0.915 \sqrt{\frac{\rho_L}{P_0 - P_v}}} \quad (1.2)$$

donde R_{max} es radio máximo de la burbuja, $2T_c$ es el periodo de oscilación, es decir, el tiempo desde que nace hasta que ocurre el primer colapso, P_v es la presión de vapor a temperatura ambiente, P_0 es la presión atmosférica y ρ_0 es la densidad del líquido [14].

El colapso de una cavidad perfectamente esférica es que puede generar velocidades de 530 m/s y temperaturas por arriba de 6000 K debido al alto grado de compresión del gas adiabático contenido en la burbuja, es decir, no hay intercambio de calor entre el interior de la burbuja y el líquido. También el colapso de una burbuja simétrica puede emitir hasta un 90% de la energía contenida como sonido; mientras que la asimetría de la burbuja puede afectar la estabilidad (amplitud) de las burbujas subsecuentes, lo cual provoca una disminución en la amplitud del sonido generado por la implosión de la burbuja.

.....
*Apéndice A. Derivación de la ecuación de Rayleigh-Plesset

1.3 CAVITACIÓN ÓPTICA

La cavitación óptica es generalmente inducida por láser de pulsos cortos enfocados sobre los líquidos. La intensidad de la luz en el foco es tan alta que puede producir una absorción no lineal (absorción de múltiples fotones) y/o ionización por avalancha provocando la formación de plasma [15]. Debido al alto coeficiente de absorción del plasma en la región del visible, se puede calentar rápidamente alcanzando temperatura del orden de 7000 a 10000 Kelvin y presiones arriba de mega pascales. Lo anterior conduce la rápida evaporación del agua que a su vez produce ondas de choque acústicas audibles.

La cavitación inducida por láser pulsado ha sido examinada en los laboratorios para estudiar el comportamiento en cavitación, tanto en una sola burbuja como en múltiples burbujas, bajo condiciones controladas. Este tipo de cavitación puede crear burbujas perfectamente esféricas por el enfoque del láser. En general el tamaño y la forma de la burbuja dependen de la intensidad y del enfoque del láser [13].

1.3.1 Termocavitación

La termocavitación es un nuevo tipo de cavitación óptica. Este utiliza un láser de excitación continua (a diferencia de la cavitación generada con pulsos cortos) enfocado en una solución altamente absorbente. Cuando el láser es enfocado sobre una parte del volumen de la solución absorbente, la radiación del láser calienta la

solución creando una región de supercalentamiento, en la cual se forma la burbuja. El radio que adquiere la burbuja depende de la potencia del haz, de la concentración de la solución y del coeficiente de absorción [5,15].

Las temperaturas alcanzadas en el foco pueden exceder los 300°C en muy corto tiempo, lo que impide que el agua hierva a pesar de calentarlo por arriba de su punto de ebullición, a este proceso se llama supercalentamiento. Es bien sabido que alrededor de esta temperatura se da una transición de fase de líquido a vapor en manera violenta. Es justamente este mecanismo que se usa para generar las burbujas. La burbuja crece hasta que la presión del vapor equilibra la presión del líquido y la presión atmosférica. Considerando un gas ideal se puede aplicar la siguiente ecuación

$$P_g \left(\frac{4\pi}{3} R^3 \right) = R_g T \quad (1.3)$$

donde P_g es la presión del gas, R_g es la constante universal del gas ideal y $4\pi R^3/3$ es el volumen de la burbuja [13]. En este punto la burbuja alcanza su radio máximo y después colapsa violentamente provocando una onda de choque hidráulico [5].

El proceso de la generación de burbujas por termocavitación, puede ser repetitivo, es decir, se pueden formar varias burbujas en tiempos cortos, lo cual puede complicar tanto el estudio de la generación de burbujas, así como su aplicación. Para poder producir una sola burbuja, se modula la corriente del láser con un único pulso cuadrado cuya anchura es controlada por un generador de pulsos con retardo programable.

Utilizando la ecuación difusión de calor (ecuación 1.4), se puede calcular la temperatura máxima alcanzada en líquidos absorbentes y su distribución espacial [15]. Los efectos de convección se pueden despreciar puesto que la fuente que se utiliza es puntual y el proceso de calentamiento es muy rápido, por lo que el líquido no se alcanza a calentar. La ecuación de conducción de calor que modela este supercalentamiento es

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (1.4)$$

donde T es la temperatura, t es el tiempo, ρ es la densidad, k es la conductividad térmica, c es el calor específico del líquido y Q es el calor depositado por el láser, dado por $Q = \alpha I$ donde α es el coeficiente de absorción e I es la intensidad del haz [15].

La figura 1.7 muestra una simulación realizada con el programa COMSOL* utilizando la ecuación 1.4, el cual no es estado estacionario. Como parámetros se utilizó la densidad y coeficiente de absorción de la solución de nitrato de cobre, y para los otros parámetros se utilizaron las constantes del agua (conductividad y calor específico) y la intensidad es la del láser utilizado posteriormente para obtener la cavitación. Se consideró gas ideal para todos los parámetros a excepción de la conductividad y el coeficiente de absorción ya que van cambiando en función de la temperatura. El eje vertical de la figura 1.7 es la profundidad de incidencia del láser, mientras que el eje horizontal muestra la difusión del calor en la muestra. Se incluye

.....
 * COMSOL Multiphysics es un paquete de modelización para la simulación de cualquier proceso físico que se pueda describir mediante ecuaciones en derivadas parciales.

una escala de colores, donde se muestra que se alcanza una temperatura de supercalentamiento de alrededor de 329 °C.

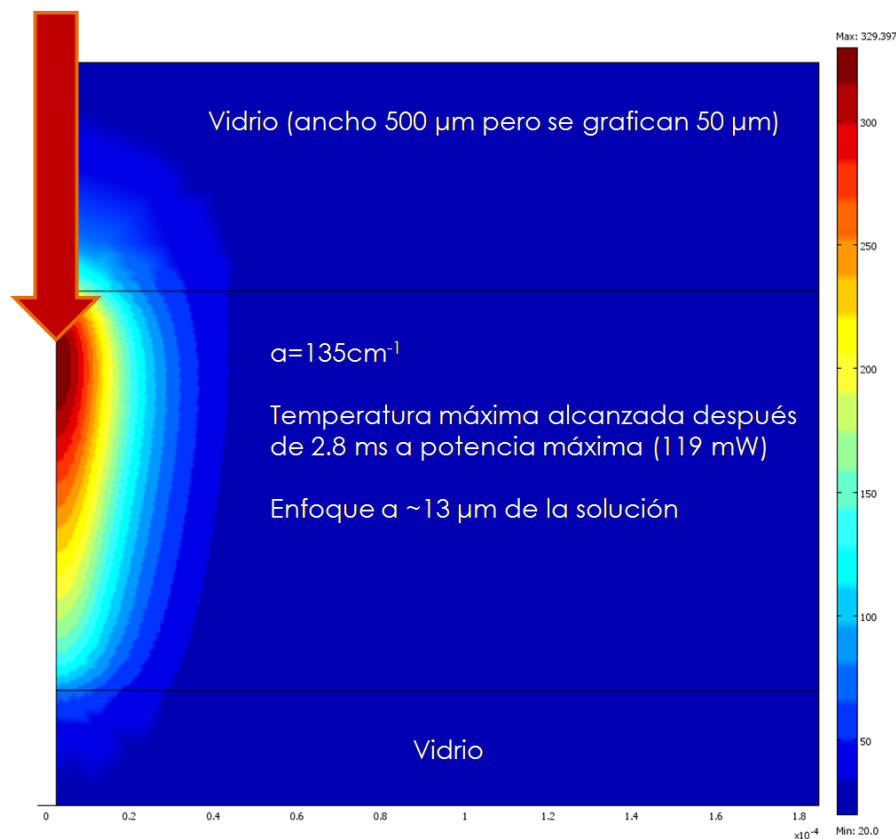


FIGURA 1.7 Simulación en COMSOL, la flecha roja indica la incidencia del láser.

A partir de las simulaciones realizadas en COMSOL, se pudo observar que cuando se enfoca el láser a bajas potencias produce mayor volumen de sobrecalentamiento debido a la difusión de calor, mientras que al utilizar el láser a potencia alta, el líquido es sobrecalentado más rápido y por lo tanto el calor no alcanza a difundirse a mayores vecindades del punto de enfoque del láser. De lo anterior se concluye que a altas potencias se obtienen burbujas de menor diámetro que a bajas potencias.

1.4 EROSIÓN POR CAVITACIÓN

Se sabe que la cavitación puede dañar paredes sólidas removiendo el material de una superficie. El fenómeno de la erosión por cavitación es complejo ya que se deben de tomar en cuenta tanto el origen de la cavitación como las propiedades del material sobre el cual se va a remover sustrato.

La erosión en sí, se debe a la concentración de energía mecánica en áreas muy pequeñas de las paredes expuestas a la cavitación. Esta concentración de energía resulta en altos niveles de tensión los cuales pueden exceder la resistencia del material (límite elástico). Desde el punto de vista de la mecánica, de la física sólida y la metalurgia, la respuesta del material al micro-bombardeo por miles de colapsos de estructuras de vapor es la llave en la erosión por cavitación.

Numerosos estudios [16] muestran que al final del colapso de una burbuja esférica es marcado por altos valores tanto de la temperatura interna como de la presión, seguida por la emisión de la onda de presión a alta intensidad.

Para determinar la presión de la onda de choque* se usa la siguiente ecuación

$$P = A\rho_0 v \left(10^{\frac{v-c_0}{B}} - 1 \right) \quad (1.5)$$

donde P es la presión de choque, v es la velocidad de la onda de choque, c_0 es la velocidad del sonido y A y B son constantes de Rankine-Hugoniot [14].

En particular, las presiones medidas a unos 4 milímetros del sustrato indican que la presión es de 1MPa. Sin embargo al acercarnos más, la presión crece

.....

*Apéndice B. Ecuación de la presión de la onda de choque.

exponencialmente obteniéndose valores de hasta 20 veces más, por lo que es posible entonces causar daño en superficies metálicas y dieléctricas.

1.4.1 Aplicaciones en la formación de microagujeros

La formación y colapso de burbujas de cavitación tienen ventaja en la termocavitación por sus bajos requerimientos de potencia de láser, así como su alto potencial en diversas áreas como son la medicina y la ingeniería. La termocavitación también puede ser útil como herramienta de ablación láser, el cual es un proceso en el cual pulsos de alta potencia provoca la extracción de material del mismo material [17], pero la termocavitación, como ya se mencionó, usaría láser continuo de baja potencia.

Una de las aplicaciones de la termocavitación es en la formación de microagujeros sobre películas metálicas delgadas, en el cual las ondas de choque provocadas por el colapso de las burbujas de cavitación ocasionan daño sobre la superficie de dicha película, que como resultado genera agujeros que pueden ser empleados como fuentes puntuales (micras) de luz o filtros espaciales.

CAPÍTULO II

DESARROLLO EXPERIMENTAL

"Creo que en la discusión de los problemas naturales, deberíamos comenzar no con las Escrituras, sino con experimentos y demostraciones".

- Galileo Galilei -

En este capítulo se presenta el arreglo experimental utilizado en la generación de microagujeros sobre películas delgadas de aluminio y titanio. Así como las características de las placas utilizadas para su perforación. Como solución absorbente se utilizó una muestra formada por agua destilada saturada al 100% con nitrato de cobre. Se realizaron pruebas en laboratorios del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE).

2.1 PELÍCULAS METÁLICAS DELGADAS

Las películas metálicas delgadas con las que se trabajó, para formar microagujeros mediante cavitación, tienen los siguientes espesores:

- × Película de aluminio: Espesor promedio de 60 nm.
- × Película de titanio: Espesor promedio de 34 nm.

Los perfiles de las películas fueron medidos con el equipo *Veeco Instruments* Inc. La figura 2.1 muestra las fotografías de las placas.

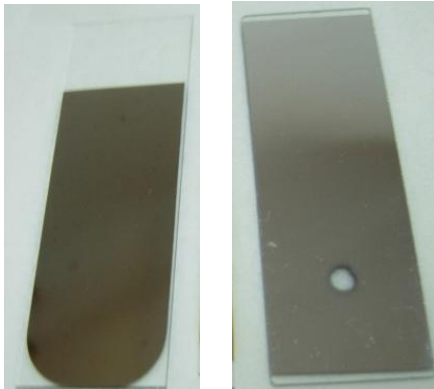


FIGURA 2.1 Derecha: Película de aluminio.
Izquierda: Película de titanio.

2.2 NITRATO DE COBRE

La solución con la que se trabajó fue sal de nitrato de cobre diluida. Al calentar la solución es posible producir gases como NO_2 , NO y HNO_3 [6,7], en adición de vapor de agua, lo cual facilita la generación de burbujas de cavitación.

2.2.1 Características

El nitrato de cobre, también conocido como nitrato cúprico, es un compuesto sólido que se presenta en forma cristalizada de sabor metálico cáustico y es de color azul que se aumenta por la adición al amoníaco [18,19]. Es soluble tanto en agua como en alcohol y ambas disoluciones con reacción ácida. Su fórmula química es $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, tiene una masa molar de 187.57 g/mol y una densidad de 2.32 g/cm³. El cobre presenta un estado de oxidación +2 (Ver Figura 2.2).

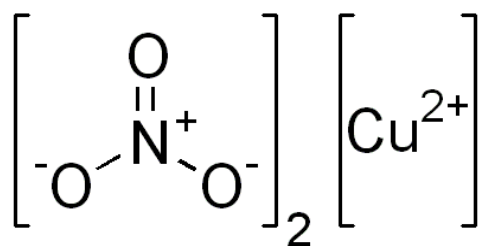


FIGURA 2.2 Estructura química del $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$.

Para generar cavitación es necesario diluir esta sal en agua destilada, esto se logra agregando 138 g de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ por cada 100 mL de agua (saturada al 100%), su concentración molar es de 5.933 y su densidad de 1.4815 g/mL. La solución tiene menor densidad a menor concentración de sal diluida en agua destilada, por ejemplo a 75% tiene una densidad de 1.4140 g/mL y a 50%, 1.2890 g/mL [20]. Se deben tomar precauciones con este compuesto ya que es nocivo por ingestión e irrita los ojos y la piel, se debe almacenar en recipientes bien cerrados y mantener en un ambiente seco, a temperatura ambiente y alejado de sustancias inflamables [21]. En la figura 2.3 se presenta una fotografía del $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ en sal y en solución.



FIGURA 2.3 Derecha: Sal de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$. Izquierda: Solución de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$.

2.2.2 Coeficiente de absorción

Con ayuda de un espectrofotómetro (Espectrómetro USB40000, Ocean Optics), una fuente de luz blanca (Lámpara de Tungsteno HL-2000), una computadora y el software del espectrofotómetro se pudo medir el coeficiente de absorción de la solución de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ saturada al 100%. Los pasos para obtenerlo se muestran en la figura 2.4 y son los siguientes:

1. La solución se introduce entre dos plaquitas de vidrio (portaobjetos).
2. La muestra se ilumina con luz blanca.
3. La luz que sale de la muestra se detecta con el espectrofotómetro.
4. Con el software del espectrofotómetro se encuentra la relación de Lambert-Beer* para cada longitud de onda.

El espectrofotómetro está formado por rejillas tipo Blaze que consiste en concentrar la máxima intensidad en el orden uno de difracción. Con esto, se obtuvo que el agua destilada saturada al 100% con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ tiene un coeficiente de absorción máximo $\alpha=210 \text{ cm}^{-1}$ a $\lambda=805 \text{ nm}$ y $\alpha=135 \text{ cm}^{-1}$ a $\lambda=975 \text{ nm}$, suficiente para producir cavitación, ya que una condición para que se obtenga cavitación en soluciones es el coeficiente de absorción de la misma y como el láser infrarrojo está en el rango puede producir cavitación. La figura 2.5 muestra el espectro del $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ para diferentes longitudes de onda.

.....
*Apéndice C. Absorbancia y Ley de Lambert-Beer.



FIGURA 2.4 Arreglo para medir el coeficiente de absorción del $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$.

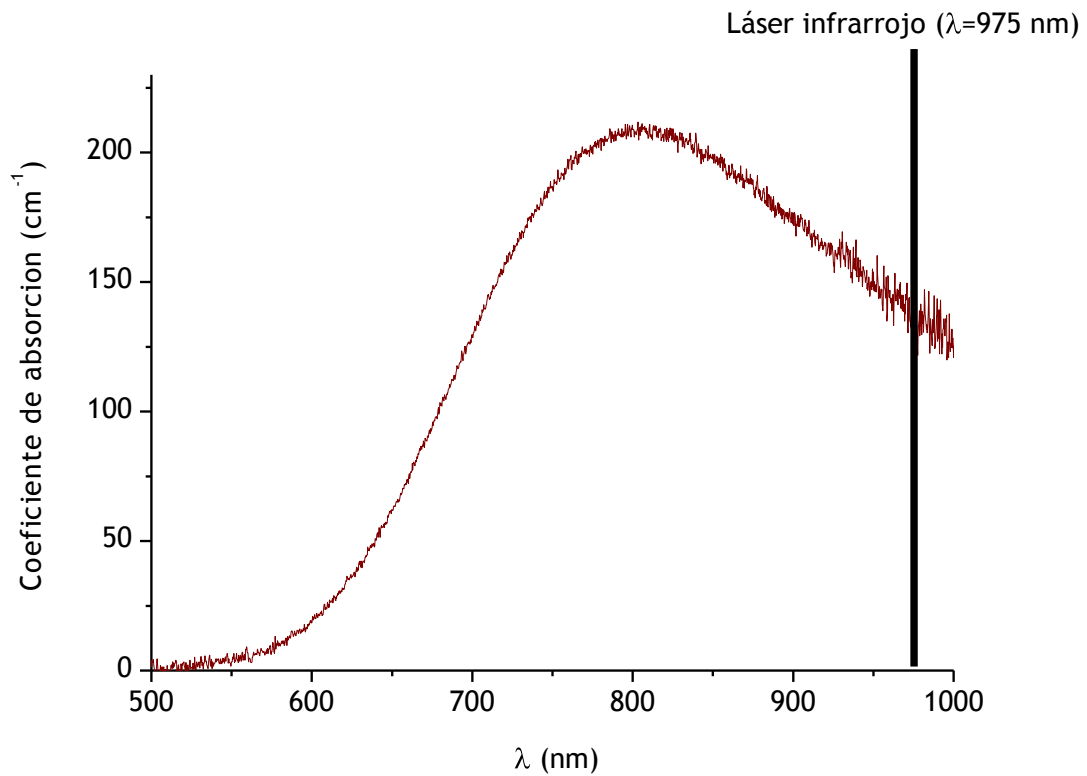


FIGURA 2.5 Gráfica de absorción para la solución de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$.

2.3 ARREGLO EXPERIMENTAL

Se utilizaron dos arreglos experimentales diferentes: Uno para analizar a la burbuja de cavitación, el cual se modificó un poco para obtener fotografías y otro arreglo para generar los agujeros por cavitación sobre las películas metálicas delgadas.

2.3.1 Análisis de la burbuja

A continuación se muestra el arreglo utilizado para la formación y colapso de las burbujas, este arreglo permite controlar la potencia del láser y por lo tanto, la frecuencia de generación de burbujas (figura 2.6).

El arreglo consiste en un sistema de láser infrarrojo de fibra óptica de excitación continua que es colimado y entra a un objetivo de microscopio que lo dirige y enfoca (spot de $\sim 10 \mu\text{m}$) en una cubeta que contiene la solución de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$. Para realizar el análisis de la cavitación se generó una sola burbuja pulsando el laser con ayuda del generador de funciones para modular su tiempo de exposición sobre la muestra. Se utilizó un hidrófono para detectar la amplitud de las ondas de choque producidas por el colapso de la burbuja. También se utilizó un láser verde, el cual se alinea a la altura de la burbuja, incide sobre ella y dispersa la luz que es detectada por el fotodetector. El hidrófono y el fotodetector son ambos conectados a un osciloscopio. Para visualizar las burbujas se utilizó una cámara ultrarrápida, la cual tiene una resolución que varía dependiendo del tiempo de

exposición con el que se trabaja (por ejemplo, para 200 μ s hay una resolución de 8 millones de frames por segundo).

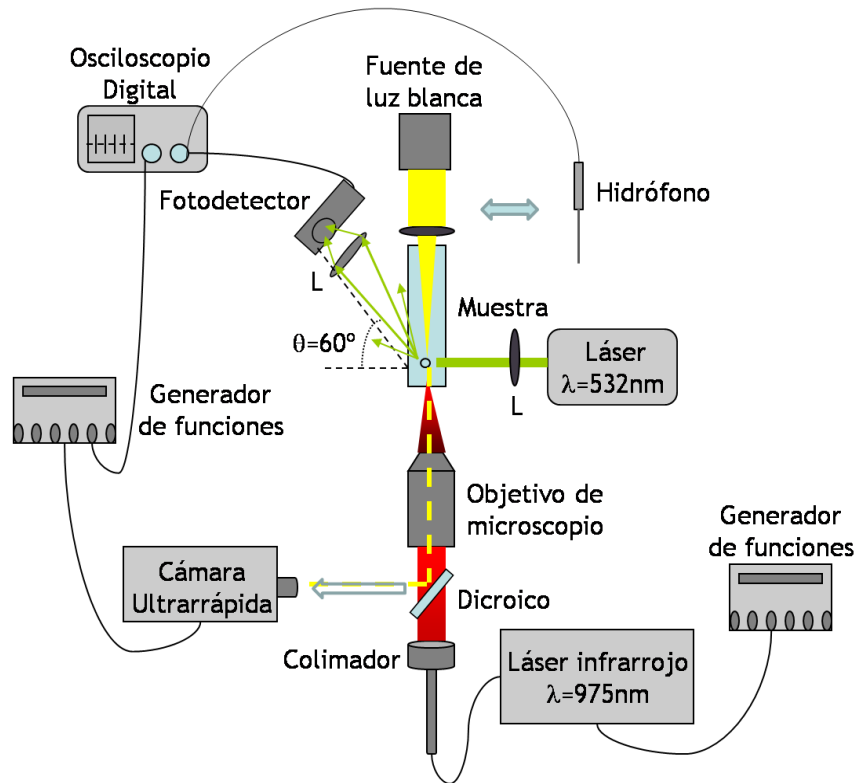


FIGURA 2.6 Arreglo experimental para analizar a la burbuja de cavitación.

El instrumental que se utilizó fue:

- Láser infrarrojo de fibra óptica (Mod. BWF-1, B&W Tek, Inc) de 975 nm. Genera las burbujas de cavitación.
- Láser verde (Mod. GL532T-500, SLOC Lázers) de 532 nm.
- Hidrófono PVDF (Mod. 11s, RP Acoustic). Detecta la presión de las ondas de choque generadas por la cavitación y permite monitorear su frecuencia. Se introduce en la muestra a 4 mm de la burbuja.

- Fotodetector (Mod. ET-203, EOT). Detecta la dispersión que genera el láser verde sobre la burbuja de cavitación, tiene un tiempo de respuesta de 300 ps y es colocada de tal manera que forma un ángulo 60° de la burbuja.
- Osciloscopio digital (Mod. TDS5104B, Tektronix). En él se conectan el hidrófono y el fotodetector.
- Generador de funciones con retardo programable (Mod. DG535, Stanford Research System, Inc). Modula el tiempo de exposición del láser para controlar el número de burbujas de cavitación. Un pulso (\sim milisegundos) genera burbuja de cavitación.

Para alinear el arreglo, obtener buenos resultados en las mediciones y no dañar el equipo se utilizó:

- Colimador. Dispositivo con canales que alinean la luz en forma paralela para enviarla a una dirección determinada. El colimador ayuda a guiar todo el haz del láser infrarrojo sin que éste se expanda.
- Espejo dicróico. Permite dejar pasar un color y reflejar otro. Se coloca después del colimador con un ángulo de 45° para dejar pasar solo el infrarrojo y desviar la luz visible.
- Objetivo de microscopio 10x. Lente que enfoca el láser a la muestra y ayuda a obtener una mejor imagen cuando se genera cavitación.
- Se utilizan dos lentes biconvexas: Una es colocada entre la muestra y el láser verde, el cual es una lente colimador. La otra es colocada entre la muestra y

el fotodetector para coleccionar la mayor cantidad de luz esparcida, tiene una distancia focal de 5 cm.

Para obtener fotografias de las burbujas se modifica el arreglo anterior, quitando el hidrófono y agregando lo siguiente:

- Cámara ultrarrápida (Mod. C2830, Hamamatsu). Se coloca de tal manera que le llega la luz blanca que se desvía del microscopio. En el modo ultrarrápido se obtiene el radio instantáneo de la burbuja en función del tiempo [22]. Este tipo de cámara es diseñada para un solo barrido (500 ps - 10 ns) y su resolución temporal es de 10 ps.
- Generador de funciones (mismo modelo que el anterior): Ayuda a controlar la cámara ultrarrápida, se conecta a ella y al osciloscopio.
- Fuente de luz blanca (Mod. 190, Dolan-Jenner). La luz se coloca directamente sobre la muestra y la ilumina para detectar la imagen de la formación de la burbuja.

2.3.2 Generación de microagujeros

El arreglo utilizado para la generación de microagujeros en las películas de titanio y aluminio (ver figura 2.7) es el siguiente: El láser infrarrojo (975 nm) se enfoca sobre la muestra utilizando el objetivo de microscopio 10x. La muestra consta de una película metálica sobre la cual se coloca una pequeña gota de solución de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ y sobre ésta una placa de vidrio con el fin de encerrar la solución. El láser infrarrojo

también se conecta al generador de funciones para modular su pulso y generar cavitación. Se utilizan el colimador, vidrio dicróico, lente biconvexa y la fuente de luz blanca que cumplen con el mismo objetivo que el arreglo anterior. Una vez que el láser infrarrojo genera burbujas, estas implotan dentro de las placas ocasionando daño sobre la película.

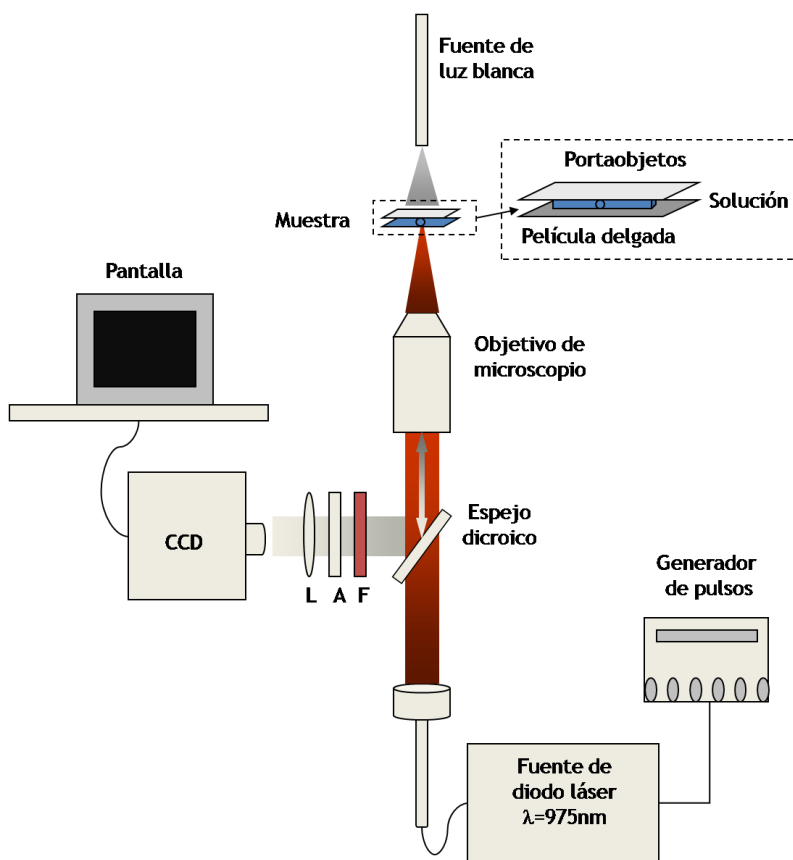


FIGURA 2.7 Esquema del arreglo experimental para la generación de microagujeros.

Para obtener imágenes se coloca una cámara CCD (Mod. Retiga2000R, QImaging) conectada a una pantalla que permite monitorear la generación de agujeros. Esta cámara es muy sensible y capta la luz para formar la imagen a partir

de ella. Para no dañar la cámara por la luz se colocan un filtro y un atenuador, los cuales son medios que absorben una porción de la luz y/o regulan el paso de la luz y también se coloca una lente con distancia focal de 10 cm.

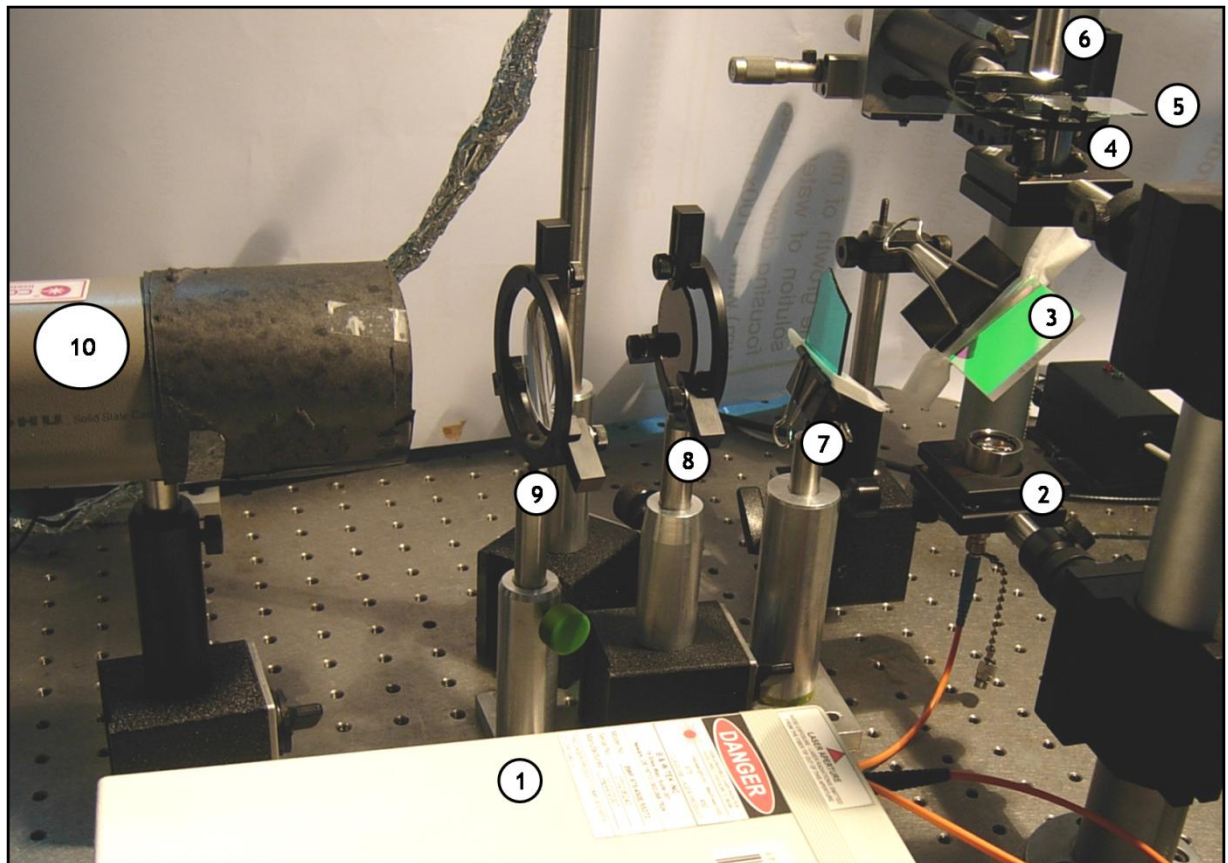


FIGURA 2.8 Fotografía del arreglo experimental donde 1. Láser de fibra, 2. Colimador, 3. Dicroico, 4. Objetivo, 5. Muestra, 6. Luz blanca, 7. Filtro, 8. Atenuador, 9. Lente, 10. CCD

CAPÍTULO III

RESULTADOS

"Locura es hacer la misma cosa una y otra vez esperando obtener diferentes resultados"
- Albert Einstein -

A continuación, se describen los resultados obtenidos experimentalmente al analizar la burbuja, así como las pruebas realizadas a las películas metálicas delgadas. Primero se presenta la medición de la frecuencia y presión originada por la cavitación en función de la potencia del láser y también el radio de la burbuja en relación a la potencia aplicada, y así encontrar las condiciones ideales para controlar la generación de una sola burbuja. Posteriormente se presenta el daño ocasionado (creación de agujeros) por la cavitación a las placas con películas metálicas delgadas.

3.1 BURBUJA DE CAVITACIÓN

Cuando el rayo del láser infrarrojo incide sobre la muestra (solución de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ dentro de la cubetita) se produce la termocavitación, es decir, la solución absorbe gran cantidad de fotones radiados del láser y se genera cavitación.

Con ayuda de la señal del hidrófono se observó que al ir aumentando la potencia del láser se creaban más burbujas de cavitación. La figura 3.1 muestra la

relación del número de cavitaciones con el tiempo, donde cada cuadrado representa el tiempo de exposición del láser controlado con el generador de funciones, las señales contenidas en ellas son el número de cavitaciones.

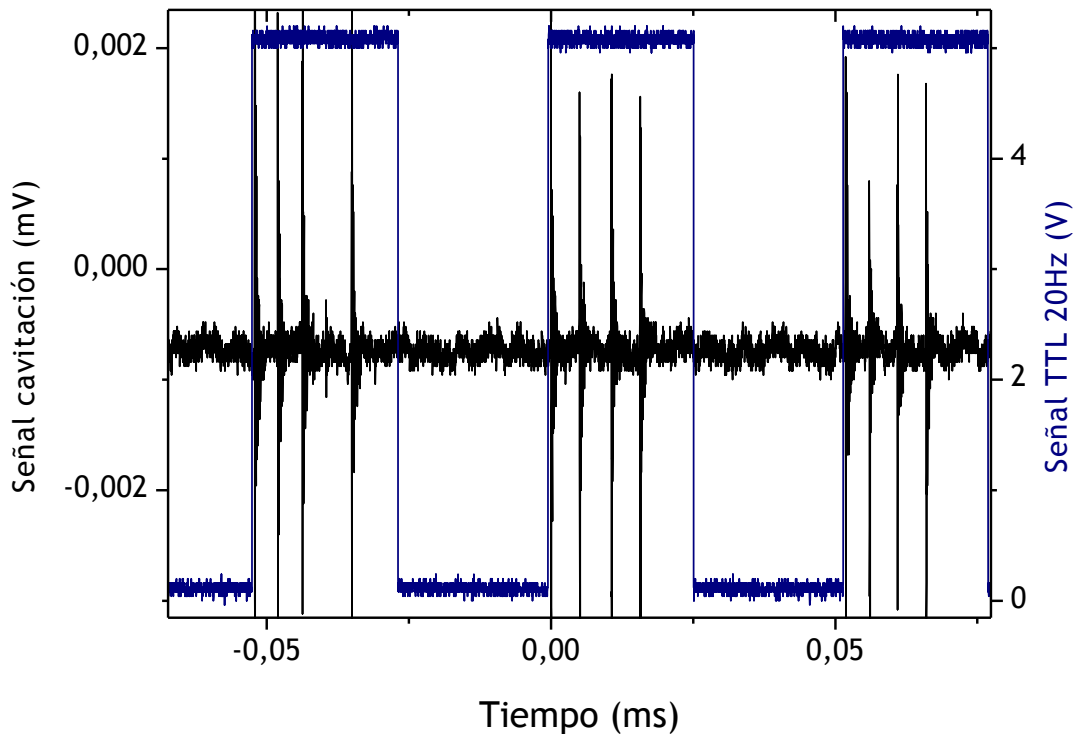


FIGURA 3.1 Señal para varias cavitaciones en función del tiempo.

Al dejar fija la potencia y aumentar el tiempo de exposición, el número de cavitaciones aumentaba y viceversa, es decir, al seleccionar un tiempo de exposición del láser fijo, y variar la potencia de laser se encontró que la frecuencia de repetición de la formación de burbujas depende linealmente de la intensidad del haz, ya que conforme aumenta la intensidad del láser aumenta linealmente la frecuencia hasta alcanzar los 4000 Hz correspondiente a la potencia máxima del láser utilizado. Estos resultados se muestran en la figura 3.2 en el cual se incluye un ajuste lineal

para comprobar que la frecuencia y la potencia son directamente proporcionales, donde la pendiente positiva muestra el aumento, que como ya se mencionó, al aumentar la potencia aumenta la frecuencia.

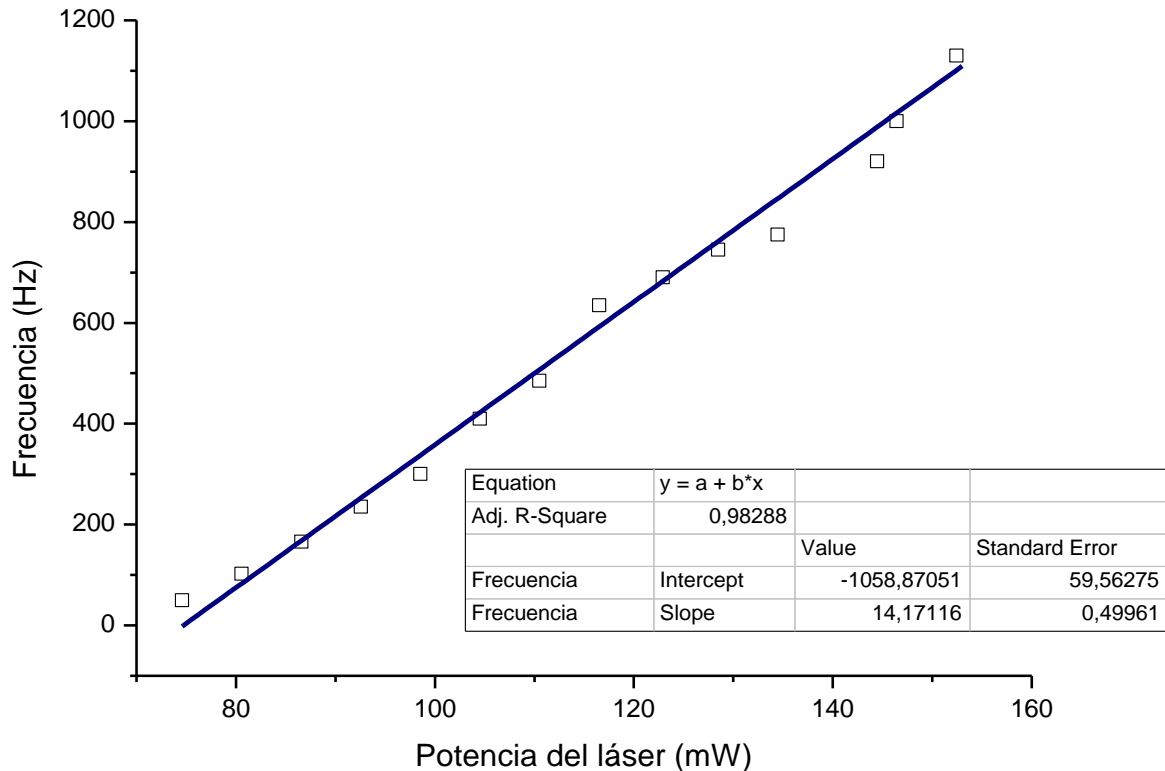


FIGURA 3.2 Frecuencia de repetición en función de la potencia del láser.

A partir de los resultados anteriores donde se observó que para “pulsos grandes” (~90 ms) a una potencia fija se creaban muchas burbujas de cavitación se fue reduciendo el ancho del pulso hasta que se llegó a generar una sola burbuja. Se encontró que para generar una burbuja de cavitación a una potencia de 119 mW se necesitan solo 2.8 ms de exposición del láser mientras que para 67mW se necesita un tiempo de 40 ms. La figura 3.3 muestra la amplitud de la onda de choque

generada por la implosión de una sola burbuja, para un pulso del orden de 10 ms a un potencia fija de alrededor de 100 mW.

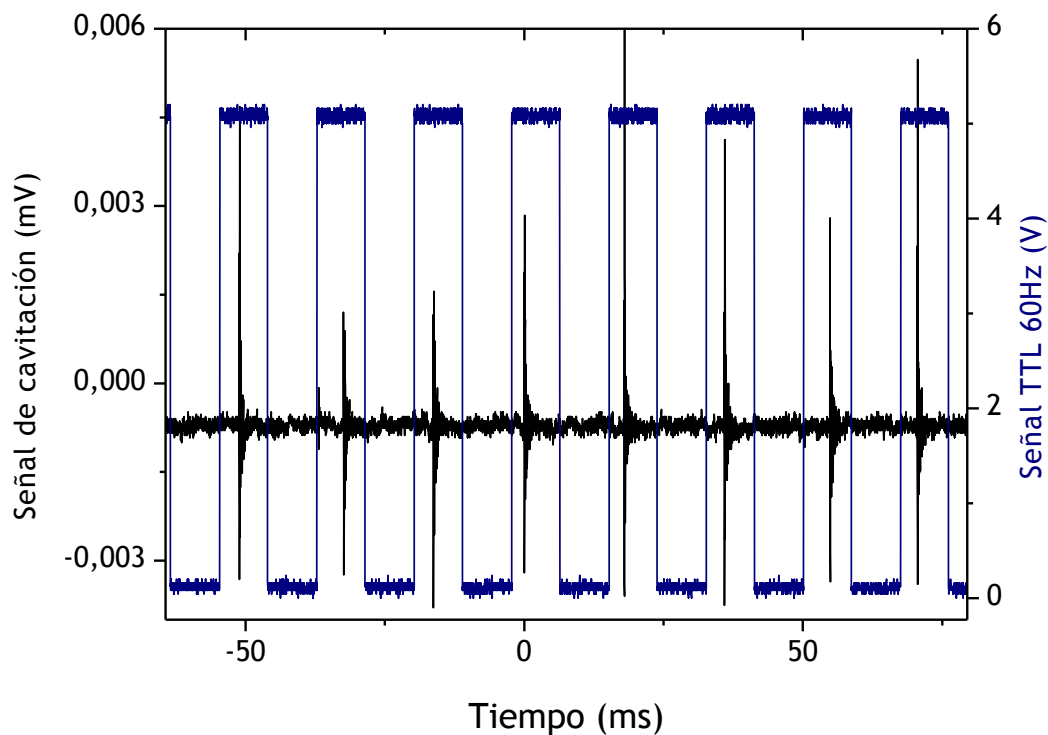


FIGURA 3.3 Señal para una cavitación en función del tiempo.

La figura 3.4 muestra la relación entre la amplitud de la presión de las ondas de choque detectadas con el hidrófono en función del tiempo, al comparar dos potencias, una de 182 mW (alta) y otra de 72 mW (baja), se puede apreciar, que cuando se utiliza una potencia baja la onda de choque es mucho mayor que cuando se utiliza la alta. Se midió la amplitud de la onda de choque generada variando la potencia, los resultados se presentan en la figura 3.5 donde se observa el ajuste que muestra cómo la amplitud decae exponencialmente conforme se aumenta la intensidad del láser.

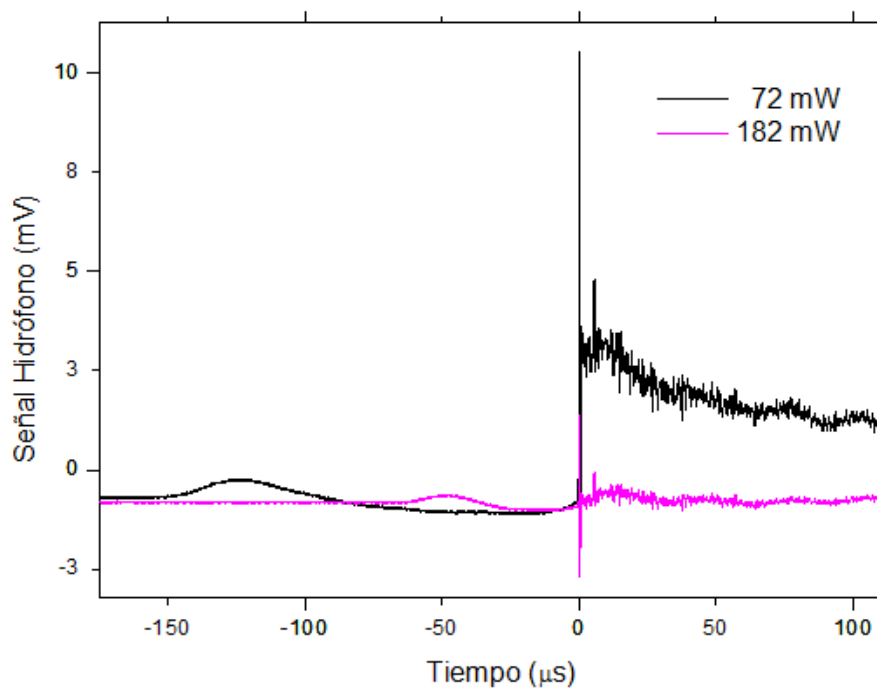


FIGURA 3.4 Señal del hidrófono (presión de la onda de choque) en función del tiempo.

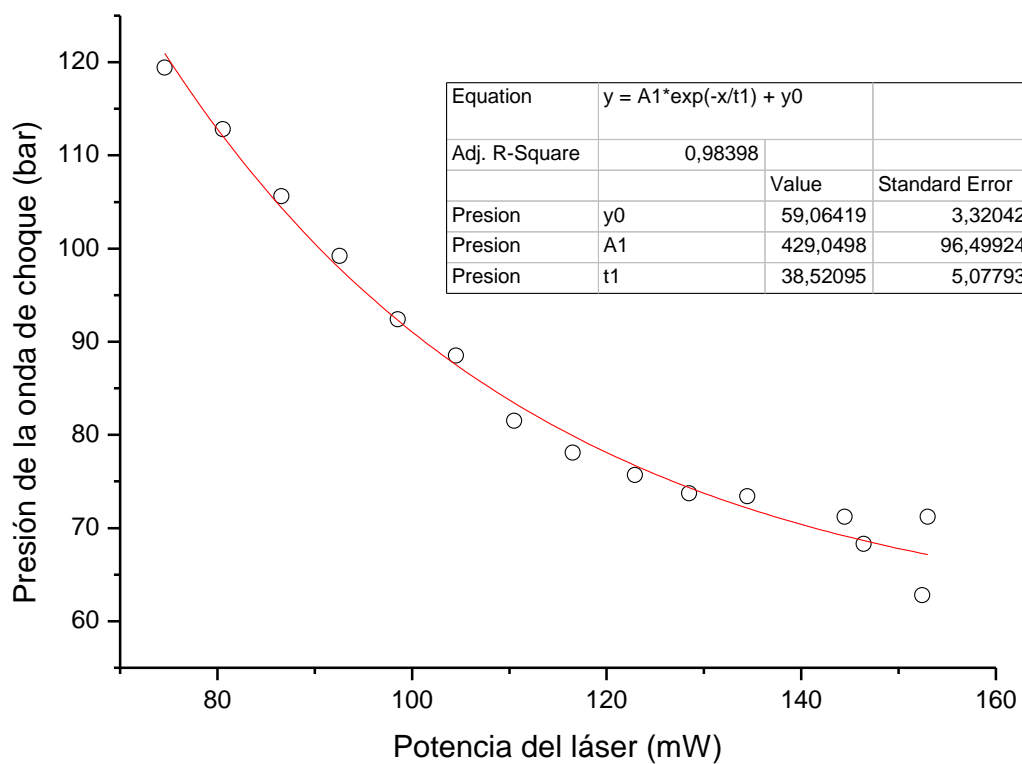


FIGURA 3.5 Presión de la onda de choque en función de la potencia del láser.

La figura 3.6 muestra las primeras fotografías de la formación, crecimiento y colapso de una burbuja de cavitación que se obtuvieron con la cámara ultrarrápida. Para esto, se dejó fija la potencia del láser a 100 mW con un tiempo de exposición de alrededor de 10 ms. Esto permite analizar temporal y espacialmente el comportamiento de la burbuja y así obtener su radio.

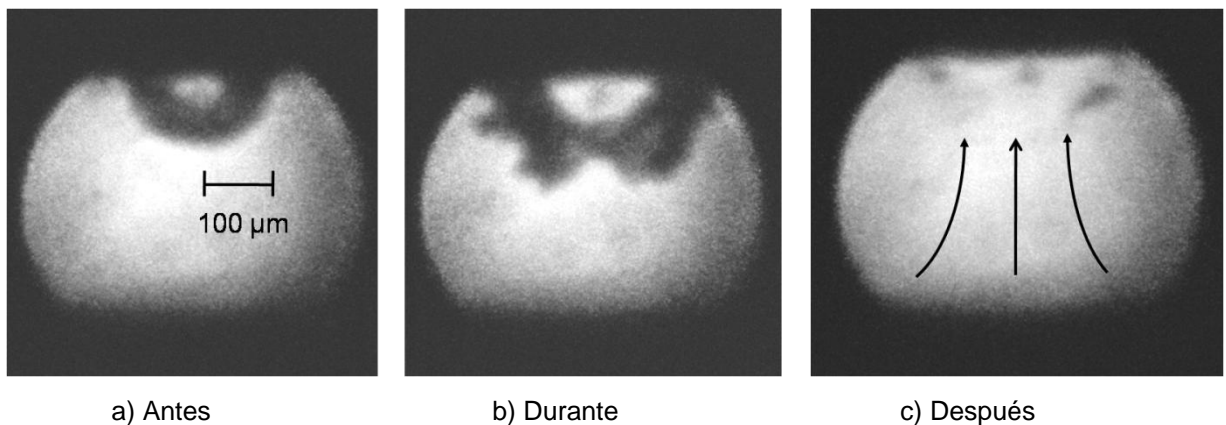


FIGURA 3.6 Burbuja alrededor del colapso.

Para calcular el radio de la burbuja se tomó como referencia una fibra óptica de 250 μm . Después de varias mediciones se obtuvieron fotos que dieron los siguientes resultados:

- 67 mW: El radio máximo de la burbuja fue de aproximadamente 340 μm . La burbuja fue creciendo hasta obtener este radio a los 50 μs e implotó en 37 μs , por lo que la vida de la burbuja a esta potencia es de 87 μs .
- 119 mW: el radio máximo de la burbuja fue de 200 μm , el cual se logró a los 40 μs . La burbuja implota en 25 μs , dándole un tiempo de vida de 65 μs .

3.2 MICROAGUJEROS

Se obtuvieron distintos agujeros dependiendo del tipo de película utilizada, la potencia aplicada y el tiempo de exposición. Las medidas de dichos agujeros se hizo con ayuda de un microscopio (Mod. DMI3000B, Leica) y también se tomó como referencia la fibra óptica.

3.2.1 Placa con película de titanio

Para las primeras pruebas con película de titanio se utilizó el generador de funciones para modular la emisión de salida del láser a máxima potencia (119 mW que genera una onda de choque de aproximadamente 5 atm de presión en un área micrométrica $\sim 100 \mu\text{m}$). Por ejemplo, usando una duración de pulso de 4 ms y potencia de 110 mW, la energía generada para una cavitación es de 440 μJ .



FIGURA 3.7 Película de titanio con microagujeros generados con cavitación

Se lograron crear agujeros generando desde 2 hasta 20 cavitaciones. La figura 3.7 muestra los agujeros creados para esta película.

3.2.2 Placa con película de aluminio

Los resultados que se obtuvieron para aluminio se muestran en la figura 3.8.

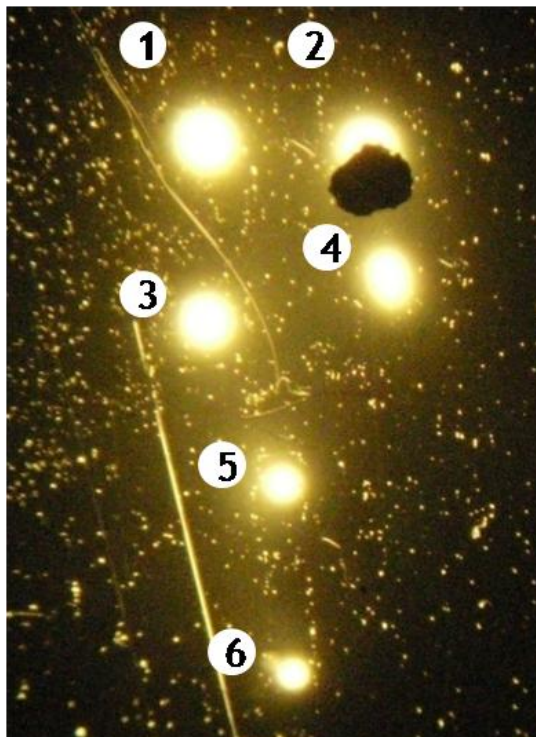


FIGURA 3.8 Película de aluminio con agujeros creados con cavitación.

Estos agujeros se crearon con:

1. Láser continuo a baja potencia (67 mW que corresponden a 6.5 atm de presión) durante 1 min. Se generó un agujero de 200 μm .
2. 310 cavitaciones a baja potencia obtenidas mediante el generador de pulsos.

El agujero generado fue de aproximadamente 200 μm .

3. Láser continuo a baja potencia durante 40 s. Se generó un agujero de 160 μm .
4. Láser continuo a baja potencia durante 50 s. Agujero de 160 μm .
5. Láser continuo a máxima potencia (119 mW) durante 15 s. El agujero generado fue de 90 μm .
6. Láser continuo a máxima potencia durante 25 s. Agujero de 80 μm .

En el agujero 2 de la figura 3.8 aparece una mancha oscura, la cual es sal del $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ que se quedó pegada sobre la placa, ya que la sal cristalizó. La desventaja de trabajar con este tipo de películas es que la solución de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ disuelve al aluminio, esto se observó al dejar pasar aproximadamente 2 horas y ver cómo ya no había película en el lugar donde se encontraba la solución.

CONCLUSIONES

"Cuando estás solucionando un problema, «no te preocupes». Ahora, «después» de que has resuelto el problema «es el momento de preocuparse»"
- Richard Feynman -

Para líquidos con alto coeficiente de absorción se puede obtener cavitación al incidirle el haz enfocado de un láser de excitación continua de baja potencia. La generación de burbujas de cavitación depende de la potencia y de la longitud de onda del láser utilizado, así como de la solución absorbente, en este caso $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ con un coeficiente de absorción de 135 cm^{-1} .

Para el análisis de las burbujas de cavitación se introdujo un generador de funciones que permitía controlar el tiempo de exposición del láser. Con esto, se comprobó que al aumentar la potencia del láser, la presión generada por la onda de choque de la implosión de la burbuja decae exponencialmente, lo cual indica que a menor potencia se obtienen burbujas de mayor amplitud y a mayor potencia menor amplitud. Por otro lado, se obtuvo que la frecuencia con que se generan las burbujas, aumenta linealmente, es decir, a menor potencia el tiempo de exposición debe ser mayor para generar una cavitación y a mayor potencia el tiempo de exposición es menor.

Lo anterior sirvió de parámetro para encontrar las condiciones óptimas para la generación de microagujeros sobre películas metálicas delgadas, ya que a mayor

potencia utilizada se logran agujeros de menor diámetro sobre las películas y a menor potencia se producen agujeros de mayor diámetro.

El tamaño y el tiempo para obtener un agujero también dependen del espesor y del material de la película de la placa. En las primeras pruebas realizadas sobre la película de titanio, se podían generar agujeros en ocasiones desde 2 cavitaciones o que podía ser tan lento que se necesitaban hasta 20 cavitaciones, de lo cual se apreció que la película no era homogénea y que por lo tanto el espesor de esta influía en la obtención de los agujeros. También se realizaron pruebas sobre una película de oro, a la cual se dejó el láser de emisión continua a máxima potencia durante 10 min y se observó que no provocó ningún agujero ni daño alguno; sin embargo, cuando se colocó la cavitación cerca de alguna ranura en la película, ésta se lograba desprender.

APÉNDICES

"Lo más maravilloso de la ciencia es que está viva"

- Richard Feynman -

A. DERIVACIÓN DE LA ECUACIÓN DE RAYLEIGH-PLESSET

Rayleigh trabajó con la ecuación que muestra el crecimiento de una burbuja de cavitación en un líquido (Figura A.1). La burbuja tiene un radio $R(t)$, una presión de vapor P_v con una temperatura T_v , mientras que el líquido tiene una presión P_∞ y temperatura T_∞ constantes [A1].

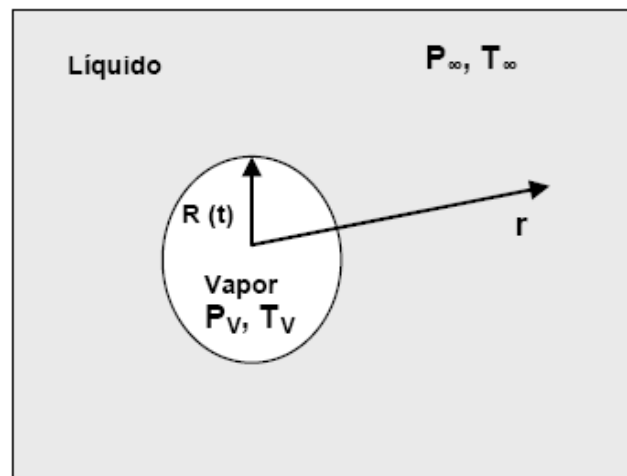


FIGURA A.1 Crecimiento de una burbuja en un líquido.

Tenemos que para un líquido incomprensible que fluye con simetría radial cercano a la burbuja [A2], las ecuaciones de continuidad y momento son:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{2v_r}{r} = 0 \quad (\text{A1})$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho_L} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (\text{A2})$$

donde r es la dirección radial, v_r es la componente radial de la velocidad, t es el tiempo, ρ_L es la densidad del líquido y P es la presión.

Como condiciones en la frontera tenemos

$$P(\infty, t) = P_\infty \quad \text{y} \quad P(R, t) = P_v - \frac{2\sigma}{R} \quad (\text{A3, A4})$$

donde σ es la tensión superficial. Integrando la ecuación A1 se obtiene

$$r^2 v_r = F_1(t) \quad (\text{A5})$$

pero en la posición $r=R$ y $v_r=\dot{R}$,

$$v_r = \left(\frac{R}{r}\right)^2 \dot{R} \quad (\text{A6})$$

Sustituyendo la ecuación A6 en la ecuación A1 e integrando respecto a r a t constante se obtiene

$$-\frac{1}{r} (2R\dot{R}^2 + R^2\ddot{R}) + \frac{R^4\dot{R}^2}{2r^4} = -\frac{1}{\rho_L} P(r, t) + F_2(t) \quad (\text{A7})$$

de la ecuación A3 y A7 tenemos

$$F_2(t) = \frac{P_\infty}{\rho_L} \quad (\text{A8})$$

sustituyendo la ecuación A4 y A8 en la ecuación A7 se obtiene

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{P_v - P_\infty}{\rho_L} - \frac{2\sigma}{\rho_L R} \quad (\text{A9})$$

La ecuación A9 es la del momento para el crecimiento o colapso de una burbuja de vapor.

B. ECUACIÓN DE LA PRESIÓN DE LA ONDA DE CHOQUE

Considerando gas ideal [B1] se obtienen las relaciones de Rankine-Hugoniot que dan los cambios de las propiedades a través de una onda de choque, que fundamentalmente es una onda con aumento de presión y de temperatura.

Para una onda de choque con velocidad v , la presión máxima está dada por

$$P = A\rho_0 v \left(10^{\frac{v-c_0}{B}} - 1\right) \quad (\text{B1})$$

donde $c_0=1483 \text{ ms}^{-1}$ y $\rho_0=998 \text{ kg/m}^3$ son la velocidad del sonido y la densidad del agua en reposo, respectivamente. A y B son constantes (datos empíricos) determinadas por Rankine-Hugoniot [14], donde $A=5190 \text{ ms}^{-1}$ y $B=25306 \text{ ms}^{-1}$. La figura B.1 muestra el comportamiento de la presión.

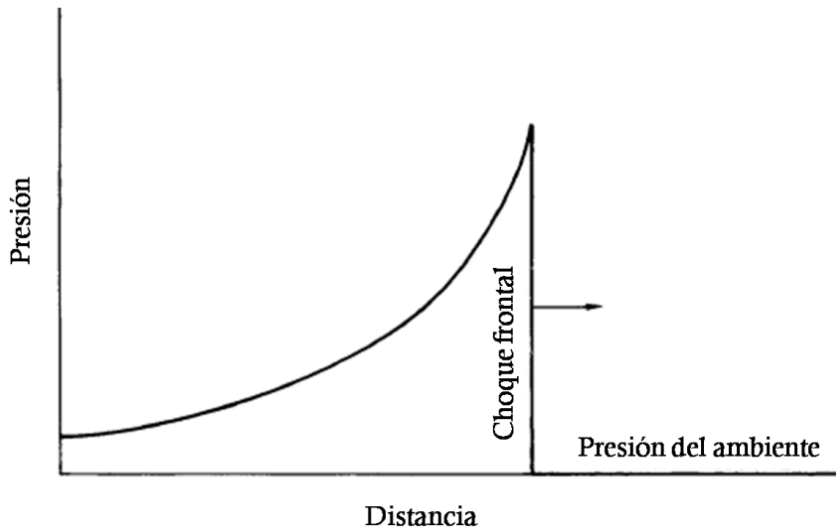


FIGURA B.1 Dinámica de la presión

C. ABSORBANCIA Y LEY DE LAMBERT-BEER

La absorbancia (A) indica la cantidad de luz absorbida por la muestra y se define como

$$A = -\log \frac{I_t}{I_o} \quad (C1)$$

donde I_o es la radiación incidente y I_t es la transmitida. Entonces una muestra no absorbe a una determinada longitud de onda cuando las intensidades incidente y transmitida son iguales, esto es

$$A = -\log 1 = 0 \quad (C2)$$

Así, la cantidad de luz absorbida depende de la distancia que atraviesa la luz a través de la muestra y de la concentración de esta [C1]. A diferentes valores de la longitud de onda se obtiene un espectro de absorción que depende de la estructura química de la molécula, el cual indica la cantidad de luz absorbida.

La ley de Lambert-Beer expresa una relación entre la absorbancia de luz monocromática y la concentración de un compuesto que absorbe luz en solución: La absorbancia de una solución es directamente proporcional a su concentración y a la distancia que recorre la luz por la solución, es decir,

$$A = \varepsilon \cdot c \cdot l \quad (C3)$$

donde c (M) es la concentración, l (cm) es la distancia y ε ($M^{-1} \cdot cm^{-1}$) es una constante de proporcionalidad, llamado coeficiente de extinción, propio de cada compuesto.

La figura C.1 muestra un diagrama de la absorción de un haz de luz atravesando una cubeta de tamaño l .

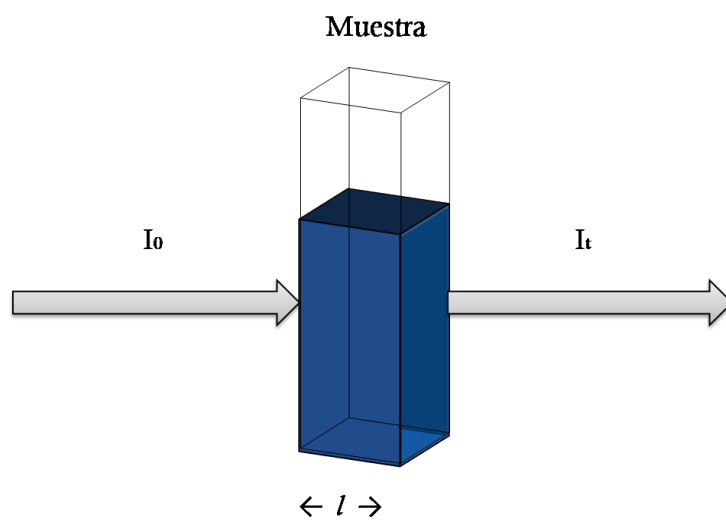


FIGURA C.1 Diagrama de la absorción.

D. ESPECIFICACIONES DEL INSTRUMENTAL UTILIZADO

Cámara CCD Retiga2000R (QImaging) [D1]	
Píxeles sensibles a la luz	1.92 millones; 1600 x 1200
Tipo de sensor	Kodak ® KAI-2020 de escaneado progresivo Interlínea CCD (monocromo o color)
Tamaño del píxel	7.4µm x 7.4µm
Salida digital	12 bits
Lectura de frecuencia	20, 10, 5MHz
Velocidad de cuadro	10fps @ alta resolución de 12 bits

Cámara Ultrarrápida C2830 (Hamamatsu) [D2]	
Característica de respuesta espectral	200 a 850 nm
Rango dinámico	>1:100 , >1:200 dependiendo del barrido
Frecuencia de repetición	1 KHz , 10 KHz
Resolución temporal	< 10 ps , < 100 ps
Rango de barrido	500 ps a 10 ns , 10 ns a 1 ms

Espectrofotómetro USB4000 (Ocean Optics) [D3]	
Dimensiones / Peso	89.1mm x 63.3 mm x 34.4 mm / 190 g
Rango	De 200 a 1100 nm
Píxeles activos y tamaño	3648 de 8 µm x 200 µm
Resolución óptica del espectrómetro	~ 0.3 - 10.0 nm (FWHM)
Tiempos de integración	10 µs hasta > 60 segundos
Ancho de banda observable	Máximo 650 nm
Linealidad corregida	> 99.8%
Diseño óptico	f/4, Asimétrico cruzado Czerny-Turner
Distancia focal	42 mm (entrada) y 68 mm (salida)
Rendija de entrada	5, 10, 25, 50, 100 o 200 µm

Fotodetector ET-2030TTL (Electro-Optics Technology, Inc) [D4]	
Diámetro del área activa	0.4 mm
Tipo y material del detector	PIN de Silicón
Salida análoga: Frecuencia y tiempo de respuesta	DC 1.2 GHz y < 300 ps
Sensibilidad	0.4A/W@830nm
Salida TTL: Frecuencia y tiempo de respuesta	DC 60 MHz y < 8 ns
Pulso (amplitud mínima detectable)	8 ns

Fuente de luz blanca 190 (Dolan-Jenner) [D5]	
Dimensiones / Peso	190.5mm x 133.4 mm / 2.1 kg
Configuración	Luz única
Voltaje y potencia	10.8 V y 30 vatios
Duración	200 horas
Temperatura	3100 K
Control de intensidad	Apagado / Bajo / Medio / Alto
Enfriamiento	Sin ventilador

Generador de funciones con retardo programable DG535 (Stanford Research System, Inc) [D6]	
Dimensiones / Peso	355.6mm x 215.9mm x 120.65 / 4.53 kg
Canales	4 salidas de retardo independientes
Intervalo	0 a 999.999,999,999,995 segundos
Resolución	5 ps y trigger 85 ns
Tiempo de los retrasos	2 a 3 ns
Sobrepico	<100 mV + 10% de amplitud de pulso
Precisión	± (50 mV + 3% de amplitud de pulso)
Impedancia	1 MΩ + 40 pF or 50 Ω

Hidrófono PVDF 11 s (RP Acoustic) [D7]	
Dimensiones	Diámetro de zona sensible: 1 mm Cable coaxial de 1.5 mm de largo
Resolución especial / Tiempo de respuesta	1 mm / 150 ns
Ancho de banda típico	1 kHz - 3MHz
Presión de pulso único de resolución	+/- 5 kPa
Sensibilidad y precisión	20 mV/MPa, +/- 15%
Rango de temperatura	10° C a 35° C

Lámpara de Tugsteno HL-2000 (Ocean Optics) [D8]	
Dimensiones / Peso	62mm x 60mm x 150 mm / 500 gramos
Rango espectral (calibrado)	300-1050 nm
Consumo de energía	600 mA @ 12 VDC
Potencia de salida	6.5 vatios
Vida de la bombilla	900 horas
Recalibración	> 50 horas de operación
Temperatura de la bombilla	3100 K
Salida de la bombilla	5 volts / 1.3 amperios
Tiempo de salida estabilizada	~30 minutos

Láser infrarrojo BWF1 (B&W Tek, Inc) [D9]	
Dimensiones / Peso	152.4mm x 76.2mm x 254mm / 1132.5 g
Longitud de onda	975 +/- 5 nm
Potencia de salida	0-450 mW
Divergencia del haz	0.22 NA nominal
Ancho de banda	< 3 nm
Energía de entrada	1A @ 110V AC, típico
Modulación	DC - 20KHz, TTL

Láser verde GL532T-500 (SLOC Láser) [D10]	
Dimensiones / Peso	135 × 130 × 61mm / 1200 g
Longitud de onda	532 nm
Potencia de salida	500 mW
Grosor de línea espectral	0.1 nm
Divergencia del haz, ángulo completo	1.5 ± 0.2mrad
Diámetro de haz, apertura	2.0 ± 0.2mm
Tiempo de calentamiento	10 minutos
Voltaje de entrada	85~240VAC, 50/60Hz

Microscopio DMI3000B (Leica) [D11]	
Enfoque	Unidades de grueso y fino
Objetivo	6 posiciones
Iluminación	Lámpara halógena de 12 V/100 W con dos filtros
General	4 grandes aberturas para prismas: deje DF, BF, anillos PH, moduladores IMC Amplificaciones de 1.25x a 100x Polarizador manual separado

Osciloscopio digital TDS5104B (Tektronix) [D12]	
Dimensiones / Peso	361mm x 447mm x 288 mm / 11.23 kg
Ancho de banda	1 GHz
Frecuencia de muestreo	5/2.5/1.25 GS/s
Canales y longitud de registro	4 canales y 16 M
Tiempo de respuesta 5mV/div	300 ps
Tiempo de resolución (un solo disparo)	200 ps
Sensibilidad	1MΩ: 1 mV/div a 10 V/div 500MΩ: 1 mV/div a 1 V/div

E. PÓSTER

Poster presentado en la reunión del XIX Verano de la Investigación Científica de la Academia Mexicana de Ciencias en agosto del 2009 dentro de sus instalaciones.



FORMACIÓN DE MICROAGUJEROS EN PELÍCULAS METÁLICAS DELGADAS INDUCIDOS POR CAVITACIÓN

S. A. Torres-Hurtado¹, A.E. Martínez-Cantón², E. Rodríguez-Aboytes², J.C. Ramírez-San-Juan², O. Baldovino-Pantaleón², A. Robledo-Martínez³ y R. Ramos-García²

¹Departamento de Física, Universidad de Sonora, Hermosillo Son
²Departamento de Óptica, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla Pue
³Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana, México DF



OBJETIVO.

Estudiar la formación de microagujeros en películas metálicas para su posible uso como fuentes puntuales de luz y filtros espaciales.

INTRODUCCIÓN.

La cavitación se define como la formación, crecimiento y posterior colapso (implosión) de burbujas de gas (cavidades) en el seno de un líquido. La cavitación produce ondas de choque y jets de agua capaces de producir daños sobre superficies. Esto se ha estudiado desde principios del siglo XX y es la base de usar cavitación para destruir piedras en el riñón o daño en turbinas de agua.

La cavitación óptica es generada por la absorción de fotones incidentes en líquido. Adicionalmente se puede obtener la formación de burbujas de cavitación utilizando un nuevo mecanismo llamado termocavitación², donde se usa un láser de excitación continua inducido sobre una solución altamente absorbente. Lo anterior se muestra en la Figura 1.

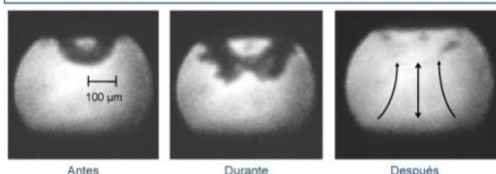


Figura 1. Burbujas alrededor del colapso

DESARROLLO.

En el presente trabajo, se muestra una aplicación de la cavitación obtenida utilizando un láser infrarrojo de excitación continua. Como solución absorbente se utilizó una muestra formada por agua destilada saturada al 100% con nitrato de cobre (coeficiente de absorción 150 cm^{-1}).

Se realizaron pruebas utilizando cavitación para lograr agujeros sobre placas con películas delgadas de oro, aluminio y titanio. La Figura 2 muestra el arreglo experimental.

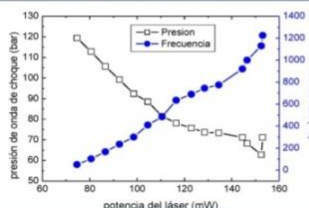
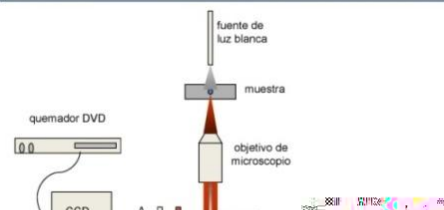


Figura 3

RESULTADOS.

- **Placa con película de oro:** Se dejó el láser de emisión continua (110 mW) durante 10 min y se observó en pantalla que no se provocó ningún agujero.
- **Placa con película de titanio:** Se utilizó el láser a máxima potencia con lo cual se logró crear agujeros con 2 hasta 20 cavitaciones. Por ejemplo, usando una duración de pulso de 4 ms y potencia de 110 mW, la energía generada para una cavitación es de 440 μJ.
- **Placa con película de aluminio:** En la figura 4 se aprecian los agujeros, los cuales se crearon con:
 1. Láser continuo a baja potencia, durante 1 min. Se generó un agujero de 200 μm.
 2. 310 cavitaciones ocurridas durante 7 min 53 s a baja potencia (~200 μm).
 3. Idem durante 40 s. (160 μm)
 4. Idem durante 50 s. (160 μm)
 5. Láser continuo a máxima potencia durante 15 s. (~90 μm)
 6. Idem durante 25 s. (80 μm.)

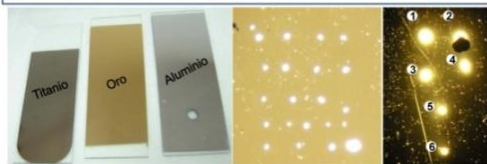


Figura 4.

CONCLUSIONES.

A mayor potencia utilizada, se obtienen burbujas de menor amplitud y la onda de choque que genera es de menor intensidad, por lo tanto se logran agujeros de menor diámetro.

A menor potencia, se obtiene burbujas de mayor amplitud

F. CAVITATION INDUCED BY CW LASERS IN ABSORBING LIQUIDS

J.C. Ramirez-San-Juan¹, E. Rodriguez-Aboytes¹, A. E. Martínez-Canton¹, O. Baldovino-Pantaleon¹,
S. Torres-Hurtado², A. Robledo-Martinez³, N. Korneev¹ and R. Ramos-Garcia¹

¹*Departamento de Optica, Instituto Nacional de Astrofisica, Optica y Electronica, Apartado Postal
51 y 216 72000 Puebla, Pue. Mexico*

²*Departamento de Fisica, Universidad de Sonora, 83000 Hermosillo, Son. Mexico*

³*Universidad Autonoma Metropolitana, Departamento de Energia, Av. San Pablo 180, 02200,
Mexico D.F., Mexico
jcram@inaoep.mx*

ABSTRACT

Novel results are presented on thermocavitation in highly absorbing solutions using CW low power laser ($\lambda=975$ nm). Due to the large absorption coefficient (135 cm^{-1}) at the laser wavelength, penetration length is only $\sim 74 \mu\text{m}$ inside the liquid and asymmetric bubbles are generated near the beam's entrance wall. We report the temporal dynamic of the cavitation bubble, which is much shorter than previously reported. We found that the amplitude of the shock wave decreases exponentially with the beam power. As shown in this work, thermocavitation is a phenomenon that has a great application potential in areas such as ultrasonic waves generation and controlled tissue ablation for use in lithotripsy.

1. INTRODUCTION

If a liquid is agitated violently, cavitation is created. Cavitation usually described as the region where the liquid's pressure decreases below its vapor pressure creating vapor bubbles. Cavitation is usually avoided because of its damaging effects on collapse particularly in hydraulic machinery and boat propellers [1-3]. However, cavitation maybe a helpful tool in areas like medicine where it can be used for tissue ablation and drug delivery [4]. Depending on the physical mechanism of creation, cavitation may be classified in four different types according to Lauterborn [5]: *i*) acoustic cavitation, *ii*) hydraulic cavitation, *iii*) particle cavitation and *iv*) optic cavitation. An extensive research has been performed in the four fields of cavitation [1-3] and will focus our attention in optical cavitation because it is the generation mechanism related to our work. Most of the research performed in laser-induced cavitation has been done with pulsed lasers focused on liquids [6-9]. The intensity of light at the focus is so high that the breakdown threshold is reached. Above this limit, nonlinear absorption and avalanche ionization leads to plasma formation which is highly absorbent to radiation from the laser, increasing its temperature to 600-15,000°K [10,11]. The liquid is rapidly vaporized by the hot plasma producing strong shockwaves with amplitude as high as several MPa to GPa values [12,13].

Cavitation in dye-doped binary solutions was first reported by Rastopov et.al [14, 15] in 1990. Binary solutions are mixtures of liquids with different boiling temperatures. This experiment was based in the creation of an overheated region from 120° to 240°C at the focal point overheating the water. Once the water is overheated, it explosively boils producing vapor bubbles. The bubble grows until it reaches a cooler region and then collapses very fast producing a strong hydraulic shock wave. Thermocavitation was the term given to this cavitation mechanism. Incident power reported was of 100mW generating periodic rises and collapses of bubbles with a frequency of 22Hz and bubble's lifetime of ~ 1 millisecond at atmospheric pressure. It is worth to mention that although thermocavitation offers a nearly perfect combination of low power, low cost and useful applications, not much research has been performed in this topic.

In this paper novel results are presented on thermocavitation in a saturated copper nitrate saline solution. The experiments were performed using a continuous-wave low power (119mW maximum) near infrared laser ($\lambda=975$ nm).

The penetration length of the photons in the liquid is very short ($\sim 74\mu\text{m}$) due to the large absorption coefficient (135 cm^{-1}) at the laser wavelength, creating close to the beam's entrance wall asymmetric bubbles. We report the lifetime of the cavitation bubble, whose value is shorter than previously reported [15] whose values ranges from 65 to $87\mu\text{s}$ depending on beam's power. It is found that amplitude of the shock. Thermocavitation may be a helpful tool for the generation of ultrasonic waves and micrometric controlled ablation for use in high-resolution photolithotrispy.

2. EXPERIMENTAL SETUP

A continuous wave near infrared laser beam ($\lambda=975$ nm) is expanded, collimated and focused with a 10x microscope objective focusing the beam in a spot of $12\mu\text{m}$ at focus into a cuvette filled with a saturated solution of copper nitrate (see Figure 1). The microscope objective (MO) is used to perform to focus the infrared beam in liquid and to image the bubble into the Hamamatsu Streak Camera C2830, using a white light source counter-propagating the infrared laser. The cavitation is generated very close to the glass interface, and it is because of the large absorption coefficient of the liquid to the laser wavelength, and penetration length of the infrared beam is only of $\sim 74\mu\text{m}$. Coherent or incoherent illumination can be used to image the bubble illuminating the cuvette sideways. For coherent bubble illumination an unfocused green laser ($\lambda=532$ nm) was passed through the center of the bubble and the light scattered is collected with a photodetector (Silicon PIN Detector ET-2030 from EOT, Inc. 0.3ns rise time) positioned at a 60° forward angle and its signal is analyzed with a digital oscilloscope (Tektronix TDS 5104B). The angle of $\theta = 60^\circ$ was chosen in order to stay away of two unwanted effects: *i*) avoid to capture the directly forward light where the average signal is less effective because the signal to noise ratio is not efficient, and *ii*) avoid backscatter where signal captured by photo detector is orders of magnitude lower [21]. In order to measure the pressure of the shock wave generated by the bubble, a calibrated hydrophone (PVDF Hydrophone Mod. RP 11s) is placed 4mm above the region where the bubble is created. The signals from the photodetector and hydrophone were recorded by the oscilloscope. Pulse delay generators were used to control de laser and the streak camera.

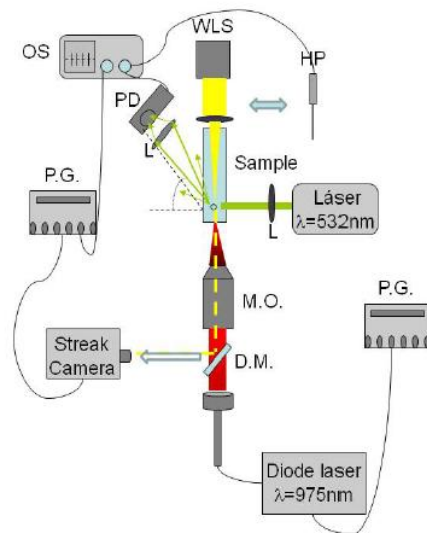


Figure 1. Experimental setup used for the generation and analysis for single bubble cavitation. PG is a pulse-delay generator, MO is microscope objective, DM is dichroic mirror, OS is digital oscilloscope, WLS is a white light source, HP is a hydrophone and PD is a fast photodetector

3. RESULTS

3.1 Multibubble Cavitation.

For liquids with high absorption coefficient at the laser wavelength, cavitation will occur as long as the laser radiation is present. In this case multibubble cavitation will be produced at a frequency determined by the laser's power. Figure 2 shows the cavitation frequency behavior as function of the beam's power. As seen, the frequency increases linearly when laser's power is increased until it reaches the maximum frequency (4000 Hz at the maximum power provided by our laser). As mentioned above, the amplitude of the shock wave generated by multibubble cavitation also varies but this time in exponential decay with the beam's power. This behavior is also seen in single bubble cavitation both in frequency and pressure amplitude of shock wave in function of the laser's power. No modulation in laser's switching was needed to get multibubble cavitation, the only parameter to control the frequency is the power of the laser as reported before [16,17]. Figure 2 shows the cavitation frequency and the hydrophone signal amplitude behavior when power of the infrared laser is varied.

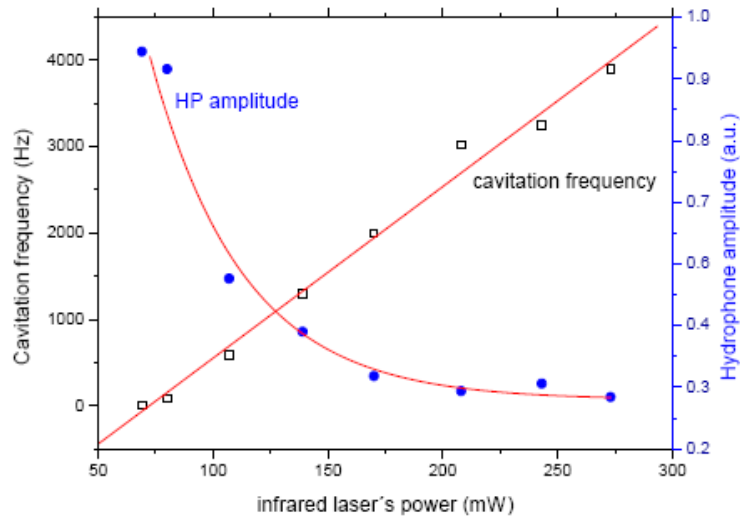


Figure 2. Cavitation frequency behavior and hydrophone amplitude as function of the infrared laser's power.

3.2 Single Bubble Cavitation

As a complete cavitation characterization is needed, multi-bubble cavitation must be avoided and the goal is to generate just one single bubble. To perform this task the infrared laser switching was modulated with a delay generator (DG535 Stanford Research Systems, Inc). When the pulse is too large the energy delivered to the liquid is continuous and multibubble process is produced, but if the width of the pulse is gradually reduced then the number of cavitations is also decreased at a given power. This process is implemented until a single bubble is produced, where typical values range from 2.8 ms at 119 mW to 40 ms at 67 mW.

In order to capture single-bubble images a streak camera was used to take both frame-mode and streak-mode pictures. The pictures taken in the frame mode, the light scattered by the bubble and collected by the photodetector, is used to trigger the delay generator which in turn controlled the camera's shutter. To enable the streak-mode, the signal from the DG was used to turn on the infrared laser and generate a single bubble, but also the pulse's rise of the signal was used as a time reference to trigger the camera. Pictures taken with the streak camera made possible to analyze the experimental evolution of the bubble's dynamic both spatially and temporally.

Thermocavitation is produced whenever a liquid is absorbing a large quantity of photons radiated from either a pulsed or continuous wave laser. As shown before, single bubble cavitation is needed in order to fully characterize the phenomenon. Figure 3 shows a sequence of three pictures taken at different times after the bubble was created. Figure 3c shows a typical snap-shot of the bubble taken with incoherent light illumination near its maximum radius. Note that the bubble is attached to the substrate and therefore approximately only one half of the bubble is produced ($\gamma < 0.5$). The dimensionless distance $\gamma < 1$, $\gamma = h/R_{max}$ characterizes the dynamics of the bubble, where h is the distance from the wall to the center of the bubble and R_{max} is the maximum bubble radius. Typical γ values in our experiment range from $\gamma = 0.25$ to $\gamma = 0.45$.

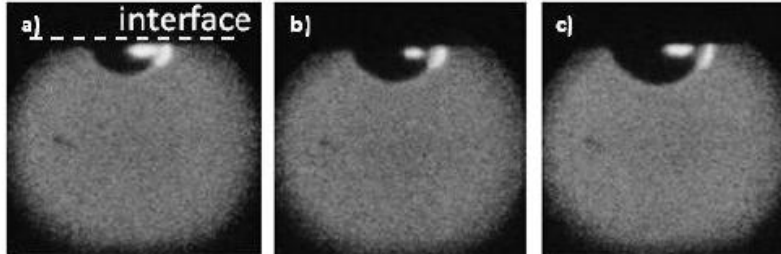


Figure 3. Pictures taken in frame mode at a) 32 μ s, b) 42 μ s and c) 52 μ s after bubble's generation. Power delivered by infrared laser was 67mW.

To capture the bubble's radius and its temporal dynamic we used the camera's streak-mode, it was triggered at same instant when infrared laser was turned on. Figure 4 shows a streak-mode picture, where x axis is the spatial dynamic and the y axis is the temporal dynamic of the bubble. Results and interpretation of the pictures are explained below.

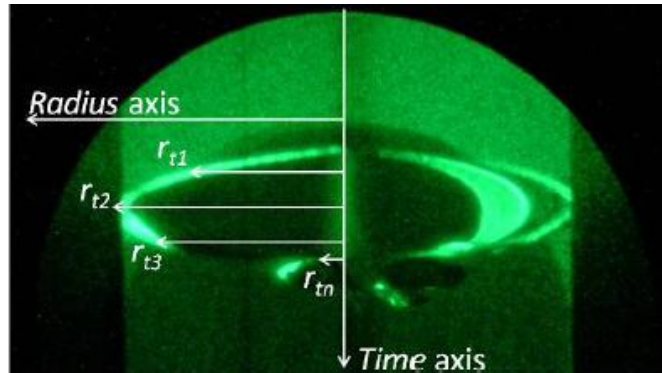


Figure 4. Streak mode picture. *Radius axis* denotes spatial bubble dynamic and *Vertical axis* denotes temporal bubble dynamic. Infrared power was 67mW. Where r_n is the radius of the bubble at time t_n

Figure 5 shows the comparison between lowest (67mW) and maximum beam power (119mW). For low beam power the maximum bubble radius ($\sim 340\mu$ m) is reached in $\sim 50\mu$ s and then it collapses in only 37 μ s, so the bubble's lifetime is 87 μ s. On the other hand for high beam's power, the bubble's radius ($\sim 200\mu$ m) is achieved in $\sim 40\mu$ s and the bubble's lifetime is 65 μ s. This results indicates that the lowest the power produces the bubble with the highest amplitude and therefore the highest shockwave amplitude. This apparent contradiction can be explained due to the smallest energy deposition rate allowing heat diffusion transfers to a larger volume and then larger vaporization volume is obtained. Thus, larger bubbles may be created and more energy is stored and released on collapse. It is also shown that velocity of the bubble's wall is higher (~ 70 m/s) for low beam's power than for higher beam's power (~ 47 m/s). Both graphs show that conversion of potential energy to kinetic energy (collapsing stage) is much faster than conversion from kinetic to potential during the bubble expansion stage. We did not observed a consistent indication of bubble rebounds as reported for pulsed and acoustic cavitation.

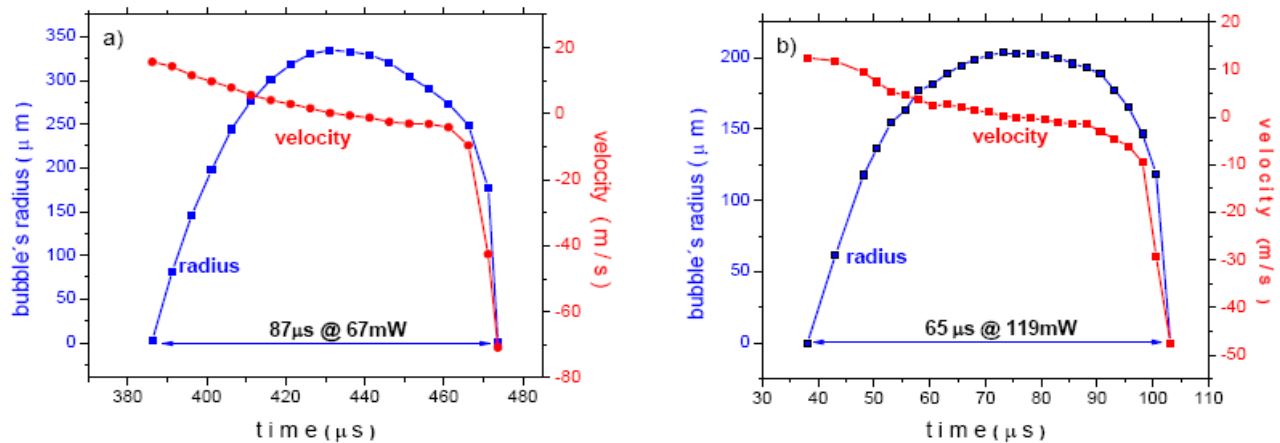


Figure 5. Bubble's radius and velocity of the bubble's wall for a power of (a) 67 mW and (b) 119 mW.

In conclusion, we have shown that low continuous wave power lasers can induce bubble cavitation in highly absorbent solutions. The amplitude of the shock wave decreases exponentially with the beam power. In multibubble generation, the frequency increases directly proportional to the beam's power. The spatial and temporal dynamic of the cavitation bubble is reported, where the temporal dynamic is much shorter than previously reported. Thermocavitation can be a useful tool for the generation of ultrasonic waves and controlled ablation for use in medicine and high-resolution lithography.

4. BIBLIOGRAPHY

1. Jean-pierre Franc, Jean-marie Michel, J. P. Franc, "Fundamentals Of Cavitation" Springer 2004
2. Christopher E. Brennen, "Cavitation and Bubble Dynamics" Oxford University Press, USA (1995)
3. F. Ronald Young, "Cavitation" Imperial College Press, London (1999).
4. L. Azar "Cavitation in Ultrasonic Cleaning and Cell Disruption" Controlled Environments February, 14-17 (2009).
5. W. Lauterborn (ed), "Cavitation and inhomogeneities in underwater acoustic" Springer-Verlag p.3 (1980).
6. L. V. Keldysh, "Ionization in the Field of a Strong Electromagnetic Wave" Sov. Phys. JETP 20, 1307 (1965).
7. C. DeMichelis, "Laser-Induced Gas Breakdown: a Bibliographical Review" IEEE J. Quantum Electron. QE-5, 188 (1969)
8. N. Bloembergen, "Laser-induced electric breakdown in solids" IEEE J. Quantum Electron. QE-10, 375 (1974).
9. J. S. Bakos, "Laser plasma 89" Prog. Quantum Electron. 14, 251 (1990).
10. P.A. Barnes, and K.E. Rieckhoff, "Laser-induced underwater sparks" *Appl. Phys. Lett.* **13** 282-284 (1968).
11. Ki-Taek Byun, Ho-Young Kwak and Sarng Woo Karng, "Bubble Evolution and Radiation Mechanism for Laser-Induced Collapsing Bubble in Water" *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, 6364-6370 (2004).
12. J. Noack, D.X. Hammer, G.D. Noojin, B.A. Rockwell and A. Vogel, "Influence of pulse duration on mechanical effects after laser-induced breakdown in water" *J. Appl. Phys.* **83**, 7488-7495 (1998).
13. C.D. Ohl, T. Kurz, R. Geisler, O. Lindau and W. Lauterborn, "Bubble dynamics, shock waves and sonoluminescence", *Phil. Thans. R. Soc. Lond. A* 357, 269-294 (1999).
14. S.F. Rastopov and A.T. Sukhodolsky "Sound generation by thermocavitation induced CW-laser in solutions", *SPIE Vol 1440*, 127 (1990).
15. B.P. Barber and S. Putterman, "Light scattering of the repetitive supersonic implosion of a sonoluminescing bubble", *Phys. Rev. Lett.* **69** 3839-3842 (1992).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W. Lauterborn (1979) *Optical Cavitation*. Journal of physique, supplement (11), pp C8-273.
- [2] P.S. Epstein, M.S. Plesset (1950) *On the Stability of Gas Bubbles in Liquid-Gas Solutions*. Journal of Chemical Physics, 18 (11), pp 1505-1509.
- [3] R. Young (1999) *Cavitation*. Imperial College Press.
- [4] J.C. Ramirez, E. Rodriguez, N. Korneev, O. Baldovinos, R. Chiu, G. Gutierrez, R. Dominguez, R. Ramos (2007) *Cavitation Induced by Continuous Wave Lasers* (Optical Trapping and Optical Micromanipulation IV). SPIE 6644, pp 66441M-1.
- [5] S.F. Rastopov, A.T. Sukhodol'sky (1987) *Self-organization of the heat cycle due to thermal cavitation during continuous laser heating of a liquid*. Soviet Physics Doklady, 32, p.671.
- [6] Z. Ding, W. Martens, R.L. Frost (2002) *Thermal activation of copper nitrate*. Journal of materials science letters 21, pp 1415.
- [7] C. Popescu, D. Fatu, R. Alexandrescu, I. Voicu, I. Morjan, M. Popescu, V. Jianu (1994) *Copper oxides obtained by CO2 laser irradiation of copper salts*. Journal of Materials Research, 9(5), pp 1257.
- [8] P.A. Quinto, V. Venugopalan, C.D. Ohl (2008) *Generation of laser-induced cavitation bubbles with a digital hologram*. Optics Express, 16(23), pp 18964.

- [9] P. Prentice, A. Cuschieri, K. Dholakia, M. Prausnitz y P. Campbell (2005) *Membrane disruption by optically controlled microbubble cavitation*. Nature Physics, 1, pp 107-110.
- [10] J.M. Michel, J.P. Franc (2004) *Fundamentals Of Cavitation*. Springer.
- [11] L.A. Crum (1979). *Surface oscillations and jet development in pulsating bubbles*. Journal of Physics, 40(11), pp C8-285.
- [12] A. Philipp, W. Lauterborn (1998) *Cavitation erosion by single laser-produced bubbles*. Journal of Fluid Mechanics, 361, pp 75-116.
- [13] Y.T. Shah, A.B. Pandit, V.S. Moholkar (1999) *Cavitation reaction engineering*. Springer.
- [14] J. Noack, D.X. Hammer, G.D. Noojin, B.A. Rockwell, A. Vogel (1998) *Influence of pulse duration on mechanical effects after laser-induced breakdown in water*. Journal of Applied Physics. 83(12), pp 7488-7495.
- [15] J.C. Ramirez, E. Rodríguez, O. Baldovino, A. Robledo, N. Korneev, R. Ramos (2010) *Time-resolved analysis of cavitation induced by CW lasers in absorbing liquids*. Optics Express, 18(9), pp 8735-8742.
- [16] S. Fukijawa, H. Takahira (1986) *Dynamics of two nonspherical cavitation bubbles in liquids*. Fluid Dynamics Research. 4(3), pp 179-194
- [17] A. Castelo (2008) *Diseño y fabricación de dispositivos híbridos planares para micro-óptica mediante irradiación y ablación láser de sustratos de vidrio*. Univ Santiago de Compostela, pp 10-11.
- [18] P.M. de Péiro, J. Rodrigo (2008) *Elementos de medicina y cirugía legal*

arreglados a la legislación española. Imprenta de la Compañía General de Impresores y Libreros, 1839, pp 361.

- [19] OXXUS QUÍMICA LTDA, *Nitrato de Cobre*. De la web <http://www.oxxusquimica.com/fuentes/pdf/Nitrato%20de%20cobre.pdf> con acceso el 27 de julio de 2010.
- [20] A.E. Martínez, E. Rodríguez, J.C. Ramírez, O. Baldovino, R. Ramos (2009) *Cavitación inducida con láser de excitación continua en soluciones absorbentes*. VI Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia (CIO).
- [21] XILENO QUIMICA TECNICA LTDA. *Hoja de datos de seguridad Xileno*. De la web <http://www.quimicatecnica.com.co/documentos/XILENO.pdf> con acceso el 27 de julio de 2010.
- [22] J.C. Ramirez, E. Rodriguez, A. E. Martínez, O. Baldovino, S.A. Torres, A. Robledo, N. Korneev, R. Ramos (2010) *Cavitation induced by CW lasers in absorbing liquids*. SPIE, 7562, pp 756211-1.
- [A1] F.A. Osorio-Benedetti (2006) *Tesis: Diseño de una hélice supercavitante*. Fundación Universidad del Norte, Departamento de Ingeniería Mecánica.
- [A2] Senocak, Inanc (2002), *A computational methodology for the simulation of turbulent cavitating flows*. Ph. D. Dissertations, University of Florida, 63-10(B), pp 4784-125.
- [B1] J. Martínez (2009) *Apuntes de Mecánica de Fluidos: 2da Parte "Flujo Comprensible"*. Universidad de Oviedo. De la web <http://www.scribd.com>

- /doc/20965178/FLUJO-COMPRESIBLE con acceso en octubre de 2010
- [C1] N. Abril, J.A. Bárcena, E. Fernández, A. Galván, J. Jorrín, J. Peinado, F.T. Meléndez, I. Túnez. *Espectrofometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas*. De la web www.uco.es/organiza/departamentos/bioquimica-biol-mol/pdfs/08_ESPECTROFOTOMETRIA.pdf con acceso el 26 de julio de 2010.
- [D1] Manual de usuario, *Retiga-2000R*, QIMAGING.
- [D2] Guía, *cámara ultrarrápida*, Hamamatsu.
- [D3] Manual de operación e instalación, *Espectrómetro USB4000*, Ocean Optics.
- [D4] Manual de usuario, *Fotodetectores con salidas analógicas y TTL*, Electro-Optics Technology, Inc.
- [D5] Manual de instrucciones, *Iluminadores modelo 190*, Dolan Jenner.
- [D6] Manual, *Retraso digital/Generador de pulsos modelo DG535*, Stanford Research Systems.
- [D7] Manual de usuario, *Hidrófonos PVDF*, RP Acoustics.
- [D8] Manual, *Fuente de luz halógena de Tungsteno HL-2000*, Ocean Optics.
- [D9] Manual de usuario, *Sistema acoplado láser de fibra BWF-1*, BWTEK, Inc.
- [D10] Manual de usuario, *Láser verde GL532T-500*, SLOC Lasers.
- [D11] Manual de instrucciones, *Microscopio DMI3000B*, Leica Microsystems.
- [D12] Manual de usuario, *Osciloscopio Digital, Hoja de Datos TDS5034B, TDS5054B, TDS5104B*, Tektronix.