



INAOE

“Diseño e implementación de un sistema de detección optoelectrónico para detección de ondas ultrasónicas en aire.”

Por:

Lic. Silvia Isabel Pérez Coeto

Tesis sometida en requisito parcial para obtener el grado de **Maestro en Ciencias en la especialidad de Óptica**

en el

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.

Asesores:

Dr. Ponciano Rodríguez Montero

Dr. Nikolai Korneev Zabello

Febrero, 2018
Tonantzintla, Puebla.

©INAOE 2018

Derechos Reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir y distribuir copias de esta tesis en su totalidad o en partes mencionando la fuente.



Resumen

En este trabajo de tesis se propone un sistema optoelectrónico compacto y de bajo costo para detectar ondas ultrasónicas en el aire, mediante la técnica de deflexión de haz.

Se utilizó un láser pulsado Nd: YAG para generar expansiones térmicas en una placa de aluminio, las cuales producen a su vez ondas ultrasónicas viajeras a través del aluminio. El haz del láser pulsado no fue enfocado, proyectando un diámetro de 8 mm aproximadamente en la superficie de la placa, lo cual no implica daño en el material.

Las ondas ultrasónicas transmitidas a la cara posterior de la placa provocan cambios en la presión del aire; a unos cuantos milímetros de la superficie; generando cambios en el índice de refracción donde pasa el haz de un láser de onda continua. Las perturbaciones generadas en el camino óptico, son detectadas y amplificadas, por el circuito detector.

El sistema detector con fotodetector bi-seccionado fue diseñado y construido con frecuencias de corte inferior y superior aproximadas a 25 kHz y 885 kHz respectivamente. El diseño es capaz de detectar señales con anchos temporales de hasta $1\text{ }\mu\text{s}$.

Experimentalmente, la sensibilidad del sistema detector aumenta conforme aumenta la cercanía de la trayectoria del haz de prueba y el foco del haz coincide con el punto de generación de la onda de choque.

El experimento está diseñado con elementos ópticos fijos en una mesa óptica y en condiciones de laboratorio, sin embargo, también se propone el diseño de un sistema detector portable para su probable uso fuera del laboratorio.

Summary

In this thesis a compact and low-cost optoelectronic system is proposed to detect ultrasonic waves in air, using the beam deflection technique.

An Nd: YAG pulsed laser was used to generate thermal expansions in an aluminum plate, which in turn produces traveling ultrasonic waves through aluminum. The pulsed laser beam was not focused, projecting a diameter of approximately 8 mm on the plate surface, so that it does not produce visible damage on the material.

Ultrasonic waves transmitted to the back face of the plate cause changes in air pressure; a few millimeters from the surface, generating changes in the air refractive index, where the beam of a continuous wave laser is positioned. The disturbances generated in the optical path are detected and amplified by a position sensitive photodetector.

The detector system was designed and fabricated with lower and upper cutoff frequencies of approximately 15 kHz and 885 kHz respectively. This design is capable of detecting signals with temporal widths of up to $1 \mu s$.

Experimentally the sensitivity of the detector system increases as the proximity of the path of the test beam increases and the focus of the beam coincides with the shock wave generation point.

The experiment was carried out with fixed optical elements in an optical table and laboratory conditions, however, the design of a portable detector system is also proposed for its probable outside laboratory conditions.

Agradecimientos

Agradezco a mi familia, amigos y novio por todo el apoyo moral que me han dado siempre. A ellos les dedico este trabajo.

Le agradezco a mis asesores toda la paciencia y el conocimiento que me brindaron; aprendí mucho de ellos y me inspiraron a continuar.

Le agradezco al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) y a su personal, siempre tan amables, me hicieron sentir en casa.

Le agradezco a CONACyT por el apoyo económico; es una fortuna haber sido becaria en algo que amo hacer.

Índice

Capítulo I

1. Introducción.....	7
----------------------	---

Capítulo II

2. Marco Teórico.....	13
2.1. Ultrasonido.....	13
2.1.1. Generación óptica de ultrasonido.....	13
2.1.2. Detección óptica de ultrasonido.....	15
2.2. Fotodiodos de Silicio.....	24
2.2.1. Principio de operación.....	25
2.2.2. Tiempo de subida/bajada (t_r / t_f) y respuesta en frecuencia (f_{3dB}).....	28
2.2.3. Linealidad.....	28
2.2.4. Ruido.....	29

Capítulo III

3. Diseño experimental.....	31
3.1. Equipo.....	31
3.1.1. Láser Nd: YAG.....	31
3.1.2. Láser de prueba.....	31
3.1.3. Osciloscopio.....	34
3.1.4. Circuito detector	35
3.2 Esquema Experimental	41

Capítulo IV

4. Caracterización de materiales.....	43
4.1. Aluminio sin defecto.....	44
4.2. Aluminio con defecto.....	46

Capítulo V

Conclusión y futuros prospectos.....	48
--------------------------------------	----

Capítulo I

1.Introducción.

Hoy en día existe un gran interés en las pruebas no destructivas (NDT) como método de observación de objetos para diferentes fines; desde el estudio de materiales [1–6], hasta pruebas de objetos biológicos [7–9]. Pero las NDT como herramienta en el control de calidad en la industria son las que mayor recurrencia tienen [10–19]. Sirven para medir el espesor y detectar fallas en algún material sin contacto y son comprendidas por muchas técnicas, pero el ultrasonido es el más eficiente y práctico [20].

El ultrasonido se ha establecido como un método predilecto para observar superficies e interiores de los sólidos, ya sea para localizar defectos o medir las propiedades de los materiales. La inspección ultrasónica se realiza con un transductor piezoeléctrico que utiliza algún líquido de acoplamiento entre el transductor/emisor con la muestra, o incluso sumergiendo la muestra con el transductor ultrasónico en agua. Sin embargo, este método de inspección provoca muchos inconvenientes e incomodidades, como tener que elegir líquidos o geles con una determinada impedancia acústica que permita un adecuado acoplamiento o que las mediciones deben ser estáticas, además de que la reflexión y transmisión parcial del ultrasonido en el acoplante puede causar un cambio en la forma de la onda conduciendo a errores en mediciones atenuadas [21,22], *etc.*

La generación y detección de ondas ultrasónicas usando láseres es conocido como “ultrasonido láser” (Laser Ultrasonic Testing, *LUT*, por sus siglas en inglés). Un sistema *LUT* consta en dos etapas: la etapa de generación de onda ultrasónica provocada por un láser pulsado y la etapa de detección conformada por un láser de onda continua. Esta técnica tiene la notable

capacidad de generar varios tipos de ondas en el intervalo del ultrasonido [23]. La generación y detección de ultrasonido por medio de láseres tiene diversas ventajas debido a que no hay contacto con el objeto; lo que permite caracterizar materiales en situaciones donde sería muy difícil y caro el estudio *i.e.* temperaturas muy altas. Estas ventajas hacen que las NDT con ultrasonido por medio del láser sea un buen candidato a diversas aplicaciones [23,24].

Desde los años 80 se han hecho avances significativos en los sistemas *LUT*; incrementando la sensibilidad de detección [23,25]. Con el uso de los sistemas *LUT* en materiales se obtiene una gran ventaja al estudiar las propiedades a distancia y en condiciones inaccesibles. El bajo costo de producción y la capacidad de realizar algunos trabajos con una eficacia única ha posicionado al *LUT* como una herramienta favorita en la industria moderna [26].

La detección del ultrasonido por medio de un láser usualmente se resuelve por interferometría. Ciertos tipos de interferómetros pueden detectar ondas ultrasónicas en la superficie de algún objeto entre los que se pueden encontrar tres tipos: los interferómetros basados en óptica heterodina; los interferómetros de velocidad o tiempo de retardo y los interferómetros diferenciales [24]. El primer tipo de interferómetro consiste en hacer interferir la onda reflejada en la superficie bajo prueba con una onda de referencia; tal como el interferómetro de Michelson o el interferómetro Mach-Zender [23]; estos sistemas son muy sensibles al desplazamiento de la superficie de prueba. La interferometría de velocidad o de tiempo de retardo consiste en hacer que la onda dispersada por la superficie de prueba interfiera con ella misma después de algún tiempo, como el interferómetro Fabry-Perot Confocal (CFP) [24]. El tercer tipo de interferómetros producen interferencia de dos ondas emitidas en diferentes puntos de la superficie de prueba, o dos

ondas emitidas en un mismo punto iluminado por dos haces diferentes [27]. Un esquema de este tipo de interferómetros se muestra en la Fig. 1.1

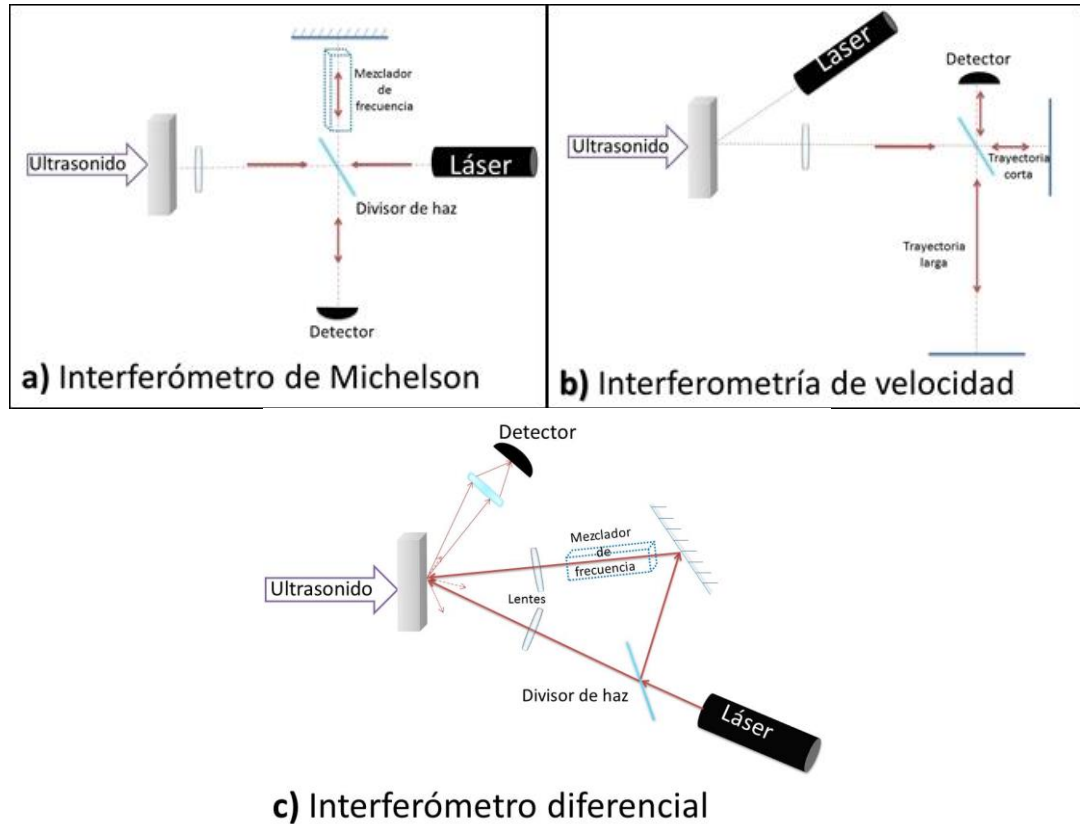


Fig. 1.1 Esquema de diferentes interferómetros para la detección de ondas ultrasónicas. (a) Interferómetro de Michelson (b) Interferómetro de velocidad, y (c) Interferómetro diferencial.

El uso de interferómetros es más complicado que otras técnicas ya que, exceptuando al interferómetro Fabry-Perot, todos requieren de una buena alineación y estabilización por compensación que contrarrestan las vibraciones ambientales [28]. Para evitar los inconvenientes anteriores, se han desarrollado otros métodos como la interferometría adaptativa o los métodos no interferométricos; entre los más comunes se encuentran los siguientes: la técnica de la navaja, técnicas basadas en reflectividad [24], fotodetectores adaptivos basados en el efecto de fuerza fotoelectromotriz de estado no estacionario [29], mezcla de dos ondas en cristales

fotorefractivos [30], transductores capacitivos, transductores electroacústicos [23,31], entre otros.

Es muy importante destacar que en todos los métodos de detección aquí mencionados tienen que iluminar la superficie de la muestra, generando problemas de *speckle*, atenuación del haz y baja relación a señal a ruido.

Proponiendo una solución a este problema en el año 2000, James N. Caron *et al.* reportaron el diseño un detector óptico para la inspección y evaluación de polímero y grafito mediante ondas ultrasónicas generadas por un láser pulsado. El sistema de detección consiste un sistema que detecta las ondas ultrasónicas después de haber sido transmitidas en el aire sin tocar el material; denominada como técnica de deflexión del haz. En la Fig. 1.2 se muestra su esquema general de su trabajo propuesto.

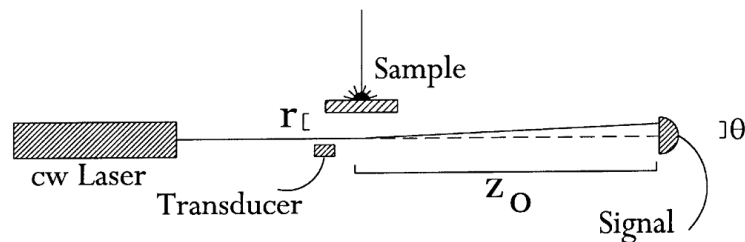


Fig. 1.2 Esquema del diseño del detector de ultrasonido propuesto por James N. Caron *et al.* Imagen tomada de [32].

En esta tesis se propone el diseño y la implementación de un sistema optoelectrónico para la detección de ondas ultrasónicas en aire utilizando la técnica de deflexión de haz y un fotodiodo bi-seccionado como herramienta principal, con el fin de estudiar materiales sólidos que podría hacer el proceso de detección más simple, con un diseño compacto, siendo tan sensible que los otros ya mencionados.

La tesis aquí presentada está compuesta por cinco capítulos. En el Capítulo 1 se introduce el problema principal, así como una reseña de los

antecedentes del problema, en este mismo Capítulo se establece el objetivo de la tesis y las metas para lograrlo. En el Capítulo 2 se concentra la teoría relevante sobre el proceso de generación y detección óptica de ultrasonido en metales y las principales técnicas; también se menciona la teoría detrás de los fotodiodos de silicio y se describen las propiedades ópticas y eléctricas, así como los principales circuitos utilizados para la captura de datos. En el Capítulo 3 se describe el equipo utilizado, las caracterizaciones, el diseño y la manufacturación del sistema optoelectrónico para la detección de ondas ultrasónicas en aire usando la técnica de la deflexión del haz. En el Capítulo 4 se pormenorizan los resultados obtenidos con el sistema de detección implementado y se muestran las gráficas más representativas obtenidas con el sistema detector de ondas ultrasónicas. Finalmente en el último apartado se presenta la conclusión donde se detallan los resultados obtenidos en todo el proceso de investigación.

Objetivo

El objetivo principal de esta tesis es diseñar e implantar un sistema opto-electrónico compacto para la detección de ondas ultrasónicas en aire mediante la técnica de deflexión de haz.

Para el cumplimiento de este objetivo general, se establecieron las siguientes metas:

Metas

- Diseñar, construir y caracterizar un circuito detector para fotodiodos bi-segmentados.
- Caracterizar el láser de prueba.
- Montar un sistema de detección basado en la técnica de deflexión de haz en condiciones de laboratorio.
- Aplicar este sistema para la detección de ondas ultrasónicas generadas en una placa aluminio.
- Proponer un sistema compacto y portable para su probable uso fuera de condiciones de laboratorio.

Capítulo II

2. Marco Teórico

En este capítulo se concentra teoría relevante alrededor del *LUT* y los fotodiodos de silicio. El capítulo se divide en dos secciones: La primera describe la teoría de la generación y la detección de ultrasonido, así como las principales técnicas. En la segunda sección, se menciona la teoría detrás de los fotodiodos de silicio; se describen las propiedades ópticas y eléctricas, así como los principales circuitos utilizados para la captura de datos.

2.1. Ultrasonido

Una onda acústica es energía que se propaga solamente a través de un medio; ya sea sólido, líquido o gaseoso. Cuando las ondas ultrasónicas se propagan en líquidos o gaseosos solo hay un modo de propagación; a estas ondas se le conocen como ondas longitudinales u ondas de compresión. Las ondas longitudinales tienen una velocidad característica según el medio en el que viaja [33]. “En los medios sólidos elásticos (la mayoría de los metales) la energía se propaga a través de ondas transversales y ondas longitudinales. Los movimientos de los sólidos elásticos pueden ser resueltos en tres componentes perpendiculares entre sí: dos transversales y una longitudinal” (Scruby, 1990).

Las ondas acústicas cubren una región de frecuencias muy amplia; desde las ondas infrasonoras (frecuencias menores de 20 Hz), las ondas audibles para los seres humanos (2 kHz-20 kHz) hasta las ondas ultrasónicas (20 kHz-10 MHz) [3,21].

El término de “ultrasonido” se refiere a la región de ondas acústicas con frecuencias por encima del límite de la audición humana, a partir de 20 kHz y

llegando hasta varios *GHz*, dependiendo la aplicación y dispositivo generador [34]. El intervalo de frecuencia más usado para las técnicas del ultrasonido abarca entre 50 *kHz* y 10 *MHz*, sin embargo, algunas frecuencias más bajas y altas también son usadas. Las ondas de sonido son fuertemente reflejadas en los bordes del material, donde las propiedades del material cambian, y por lo tanto, se usan frecuentemente para mediciones de espesores y para la detección de fisuras [3].

El ultrasonido puede ser propagado a distancias relativamente grandes en muchos sólidos y líquidos, sin embargo, hay un número de mecanismos de pérdida, tal como la absorción debida al medio o la dispersión por las discontinuidades, esto causa que la señal sea atenuada. A pesar de que la atenuación puede tener varios orígenes, generalmente aumenta cuando la frecuencia del ultrasonido aumenta, entonces, mientras el ultrasonido de unas cuantas decenas o centenas de *kHz* se propaga a varios metros en metal, las distancias se reducen a centímetros cuando la frecuencia aumenta a más de 10 *MHz*; así que las distancias son reducidas hasta fracciones de milímetro cuando la frecuencia aumenta. La absorción y el esparcimiento similarmente restringen el uso del ultrasonido en líquidos a frecuencias altas. En gases como el aire la atenuación es grande; los caminos de propagación se limitan a unos cuantos centímetros una vez que la frecuencia se eleva por encima de 1 *MHz*. Cuando un haz de ultrasonido incide en una interfaz entre dos medios diferentes, cierta energía se transmite a través del segundo medio a pesar de que ocurre refracción y el resto de la energía es reflejada hacia el primer medio. Las proporciones de la energía ultrasónica que se transmite y la que se refleja, pueden ser calculadas si se conocen las propiedades de los medios. Cuando uno o ambos medios son sólidos elásticos, generalmente al menos dos de los modos de propagación se acoplan juntos, entonces la energía puede ser transferida de la compresión a las ondas transversales y viceversa: “*El modo de conversión*”, como es

conocido, puede ser benéfico ya que potencialmente habilita más información para ser extraída del espécimen bajo inspección, sin embargo, también añade datos a la complejidad del ultrasonido, añadiendo dificultad a la interpretación [21,36].

El estudio del ultrasonido originalmente empezó en el siglo XIX; sin embargo el uso de las ondas ultrasónicas en pruebas no destructivas comenzó propiamente alrededor de los años 20 [33]. Gracias a la atención que se le dio, diez años después, las técnicas con ultrasonido ya eran muy recurridas dentro de dichas pruebas. Recientemente, las técnicas de ultrasonido han progresado significativamente, debido a la necesidad de extraer datos precisos en el estudio de materiales [37].

Las técnicas con ultrasonido se basan en la introducción o generación de ondas ultrasónicas en distintos tipos de materiales para estudiar las perturbaciones resultantes con el fin de detectar fallas en la superficie y dentro del material. La onda ultrasónica viaja en diferentes formas (p.e. ondas bulk, Rayleigh, Lamb, etc.) a través del material teniendo ciertas pérdidas y reflexiones en las interfaces. Las ondas reflejadas, así como las transmitidas, son analizadas para determinar la presencia, el tamaño y la localización de fracturas y discontinuidades dentro del material [21,35,38].

2.1.1. Generación óptica de ultrasonido

Cuando un pulso de láser incidente interactúa con algún metal, cierta parte de la energía electromagnética es absorbida y convertida en energía térmica [20].

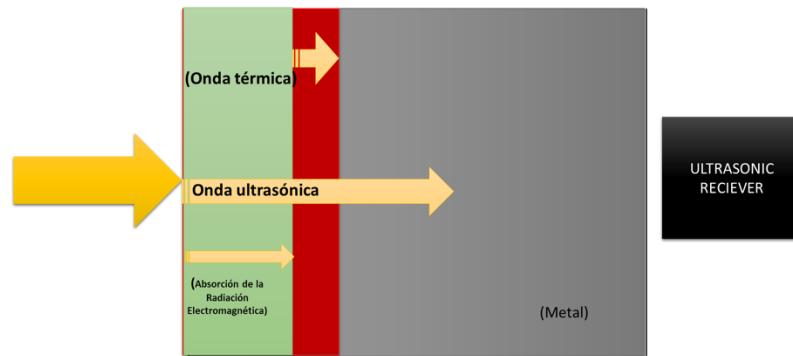


Fig. 2.1 Diagrama de la generación de ondas ultrasónicas

En la Fig. 2.1, se muestra un esquema de la generación del ultrasonido. “La absorción de la radiación se produce dentro de la *profundidad de piel* de típicamente de unos cuantos nanómetros. Cuando ocurre la absorción, la temperatura del material sube unas cuantas decenas o centenas de magnitud a un tiempo determinado dependiendo de las características y grosor del material. El incremento rápido del material causa tensiones termoelásticas transitorias, además de presiones en la superficie cuando el metal trata de expandirse. El resultado de la rápida expansión térmica en la región local, conduce a la generación de ultrasonido dentro del medio” (Scruby, 1989).

Existen diferentes regímenes para la producción de ondas ultrasónicas en metales utilizando longitudes de onda en el infrarrojo cercano: el régimen termoelástico, régimen plasmático, régimen de la superficie localizada, entre otros, sin embargo, sólo se mencionarán los primeros dos a continuación.

Régimen Termoelástico

La generación ultrasónica en el régimen termoelástico ocurre cuando la energía térmica proveniente de un pulso del láser crea una expansión localizada en el material.

Un pulso de energía emitido desde un láser de alta potencia es capaz de crear una expansión termoelástica cuando incide en la superficie de un sólido opaco. La expansión termoelástica es la responsable de iniciar el pulso ultrasónico en el material, usándolo de cierta manera como el transductor.

El régimen termoelástico tiene densidades de potencia menores a $10^7 W/cm^2$ en metales usando un láser con longitudes de onda en la región visible y el infrarrojo cercano. En este régimen de generación las amplitudes de las ondas de compresión, de corte y superficiales (de Rayleigh) se incrementan linealmente con la densidad de potencia (Scruby, 1981).

Si la superficie del metal está libre (sin carga), entonces las tensiones principales en este régimen termoelástico son paralelas a la superficie, aunque existe una deformación en la dirección perpendicular (Scruby, 1989). En la Fig. 2.2 se puede observar el esquema de funcionamiento del régimen termoelástico.

La energía óptica que se absorbe depende de la longitud de onda de la luz del láser y de las propiedades del material absorbente. La variación de la intensidad óptica con la profundidad dentro de un medio absorbente iluminado por un haz de luz a incidencia normal se proporcióna con la relación de decaimiento exponencial [39].

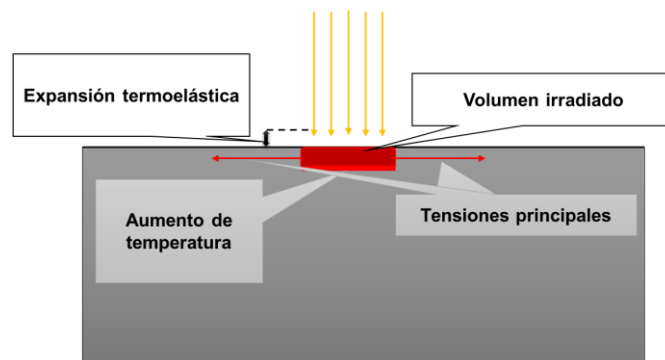


Fig. 2.2 Régimen Termoelástico: A potencia baja se produce calentamiento, ondas térmicas y ondas elásticas (ondas ultrasónicas).

El régimen termoelástico es completamente inocuo mientras el aumento de temperatura no dañe al material. Cuando el láser se enfoca para producir densidades de potencia típicamente mayores a 10^7MW/cm^2 , se forma entonces un plasma. Bajo estas condiciones, se remueven unos cuantos micrómetros de metal de la superficie y se provoca una tensión reactiva sobre ella; llamada región plasmática o abrasiva [23].

Régimen abrasivo

El régimen plasmático tiene densidades de potencia típicas mayores a 10^7W/cm^2 para un metal en la región de longitudes de onda infrarroja cercana y visible. La generación de ondas de compresión y superficiales (de Rayleigh) se favorece en este régimen (Scruby et al 1981).

En la Fig. 2.3 se muestra el proceso de la región abrasiva; en este régimen la señal se genera con altas densidades de potencia incidente, generando ablación del metal y generación de plasma, el gran aumento de la temperatura superficial causa fusión y vaporización, la ablación de metal provoca una tensión reactiva normal a la superficie.

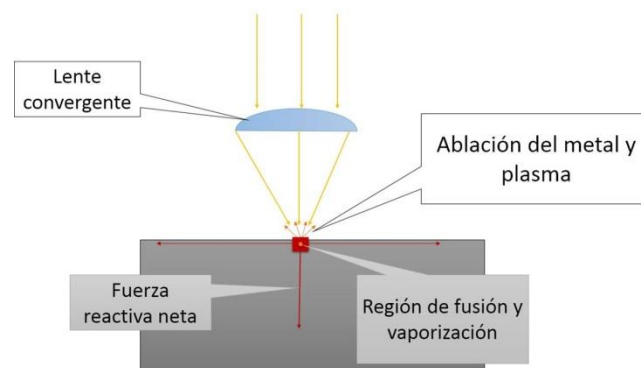


Fig. 2.3 Régimen Abrasivo

A mayores densidades de potencia, a la generación termoelástica se le añade la ablación de electrones e iones que forma un plasma con su consecuente expansión alejándose de la superficie del metal. El pulso de momento resultante se transmite adentro del sólido permitiendo la producción de un pulso de onda de compresión epicéntrica. Una fosa de abrasión pequeña, de cerca de 5 μm , se forma por este proceso [40]

Aunque se incrementa la amplitud de la onda de compresión generada, este daño puede volverla impráctica, por lo que en esta tesis no se trabajará con este régimen.

2.1.2. Detección óptica de ultrasonido

La detección de ultrasonido de manera remota ha tenido mucha atención desde sus inicios debido a la capacidad de medir el ultrasonido sin la necesidad de tocar la materia, lo cual facilita medir ondas ultrasónicas provenientes de materiales con un difícil acceso, tal como materiales a temperaturas muy altas. Otra característica conveniente de la detección óptica del ultrasonido es que puede medir anchos de banda amplios y varios tipos de ondas ultrasónicas [41].

La detección de ultrasonido por medio de varias técnicas interferométricas es el recurso más usado en el *LUT*. Los sistemas interferométricos se pueden clasificar a su vez en tres tipos: la óptica heterodina, la interferometría diferencial y la interferometría de velocidad o tiempo de retardo.

- *Óptica Heterodina*

La óptica heterodina se basa en hacer interferir dos ondas con frecuencias ligeramente distintas; la primera proveniente del láser onda haz de referencia y la segunda proveniente de la onda dispersada por el material bajo prueba; llamada haz de prueba esta última puede tener un frente de onda muy distorsionada y complicada.

Para este tipo de técnica comúnmente se utiliza el interferómetro de Michelson. En la Fig. 2.4 se muestra el interferómetro de Michelson. En este tiempo de interferómetro le haz de prueba es reflejado directamente en la superficie bajo prueba, mientras que el haz de referencia es reflejado en un espejo. Cuando el material bajo prueba es afectado por una onda ultrasónica, el haz de prueba reflejado en éste, sufre un cambio de fase dependiente del tiempo. El haz de prueba es recombinado con el haz de referencia produciendo un patrón de interferencia en un fotodetector. La superficie desplazada por el ultrasonido causa pequeños cambios en la amplitud de las franjas de la interferencia que es interpretada por el fotodetector como cambios en la corriente de salida. Esta señal de corriente puede ser procesada como cualquier otra salida de transductor.

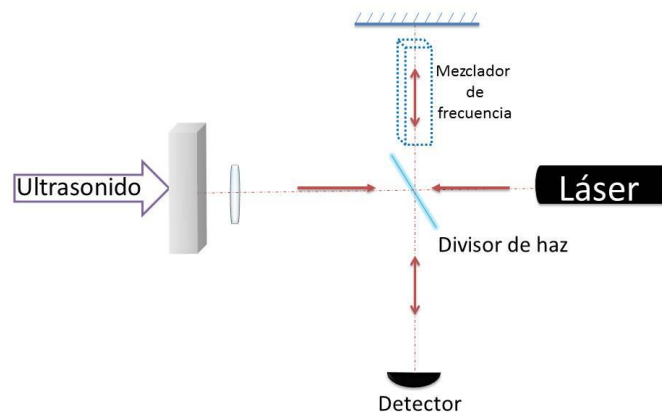


Fig. 2.4 Figura de un interferómetro de Michelson utilizado para detectar ondas ultrasónicas.

El interferómetro de Michelson puede ser usado en superficies sin pulir, rugosas, maltratadas o ásperas sólo si se expande el diámetro del haz y luego se enfoca en una zona muy pequeña en la superficie bajo prueba. Entre más corta sea la longitud focal del lente, habrá más luz dispersada por la superficie que viajará por el interferómetro y tendrá más sensibilidad.

Los interferómetros utilizados para las *NDT* deben ser modificados para reducir la sensibilidad de la vibración y trabajar con superficies rugosas. Una de las respuestas para resolver este problema es emplear un circuito de retroalimentación de amarre de fase a través de un dispositivo electrótico como una celda Pockels. Buscando resolver el problema, se han estudiado en las últimas décadas otras distintas técnicas

- *La técnica de la navaja*

Cuando una onda ultrasónica se propaga en un material, se produce una ondulación que provoca la desviación de un haz láser enviado a la superficie. La desviación del haz se mide con un detector con un borde afilado adelante de éste o un detector sensible a la posición. En la Fig. 2.5 se muestra el esquema de la técnica de la navaja: cuando una onda ultrasónica viaja en una superficie y se propaga a lo largo de esta, una ondulación producida causa una deflexión del haz que está tocando el material. La desviación del haz se mide con un detector y enfrente de éste, un objeto afilado. Este detector simple puede ser sustituido por un detector de posición sensitiva. Un factor importante para la detección con esta técnica es que el tamaño del haz debe de ser más pequeño que la onda que se propaga en el material. El límite de detección que se reporta en [42] es de 10^{-2} \AA sólo sobre una superficies pulidas, con un detector con ancho de banda de 1 MHz y un láser de 10 mW. Esto corresponde a un límite de detección de unos pocos $10^{-6} \text{ \AA} (\text{W/Hz})^{1/2}$

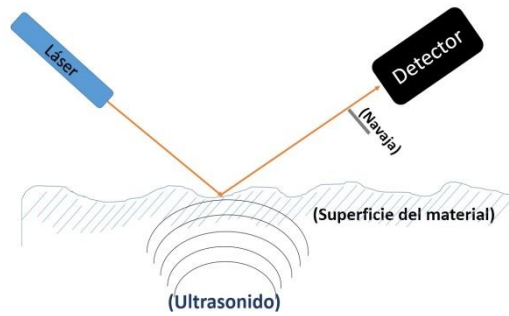


Fig. 2.5 Esquema de a técnica de la navaja

Esta técnica es muy sensible a las vibraciones y superficies pulidas, lo que implica sólo su uso en condiciones de laboratorio.

- *Técnica de absorción con filtro de luz*

Esta técnica se basa en la demodulación de frecuencia. En la Fig. 2.6 se observa un esquema del funcionamiento de esta técnica y consiste en lo siguiente:

Un láser transmite un haz de luz coherente sobre la porción superficial de la muestra que responde a una onda ultrasónica. Esta onda se deforma entre las amplitudes 1 y 2. La velocidad acústica provoca la modulación de frecuencia de la luz láser provocada a su vez por el efecto Doppler. Por lo tanto, la luz refractada contiene las frecuencias de luz $f_L - \Delta f$ a $f_L + \Delta f$ donde f_L es la frecuencia de la luz láser y Δf la frecuencia cambia debido al efecto Doppler hacia arriba y hacia abajo a lo largo de la escala de frecuencia. La luz dispersada es llevada a una lente convergente y es transmitida a un filtro de luz.

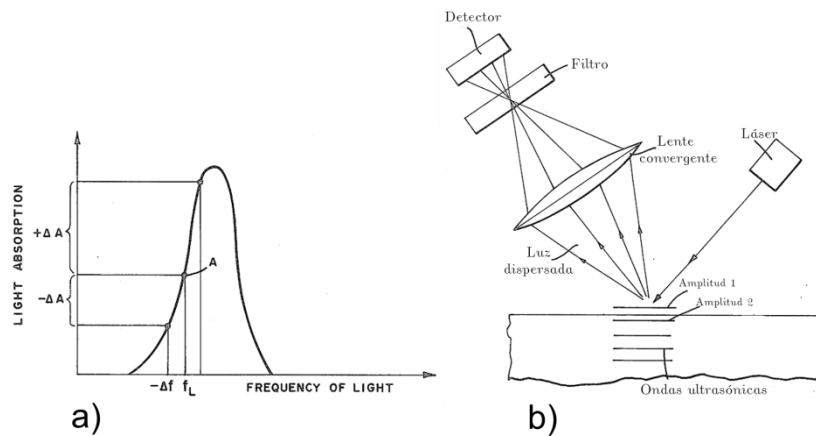


Fig. 2.6 a) Gráfico de la característica de bloqueo dependiente de la frecuencia del filtro de luz. Imagen tomada de [43] b) Diagrama esquemático del detector ultrasónico [43]: La luz dispersada contiene las frecuencias de luz que va de $f_L + \Delta f$ a $f_L - \Delta f$ donde en f_L es la frecuencia de la luz láser y Δf la frecuencia que cambia debido al efecto Doppler hacia arriba y hacia abajo a lo largo de la escala de frecuencia.

La línea de absorción, que es la característica de bloqueo del filtro de luz, debe estar situada de tal manera que la frecuencia de la luz láser está dispuesta a lo largo de la porción de pendiente más empinada del filtro, como se ve en la Fig. 2.6 Correspondiente a los valores superior e inferior de Δf la pendiente del filtro de luz proporciona una modulación de amplitud ΔA . Por lo tanto, la luz procedente del filtro de luz es modulada en frecuencia, así como modulada en amplitud. El fotodetector sucesivo produce una señal de salida eléctrica modulada que responde a la modulación de amplitud de la luz [43].

- *Fotodetectores adaptativos*

Recientemente se ha utilizado los fotodetectores adaptativos, basados en el efecto de fuerza foto-electromotriz (*FEM*) de estado no estacionario para medir pequeñas vibraciones laterales producidas por interferometría Speckle [29]; sin embargo éste tiene la desventaja de tener una sensibilidad más baja que los interferómetros convencionales [14,29]. En la Fig. 2.7 se muestra un ejemplo de detección de ultrasonido utilizando FEM y mezcla de dos ondas.

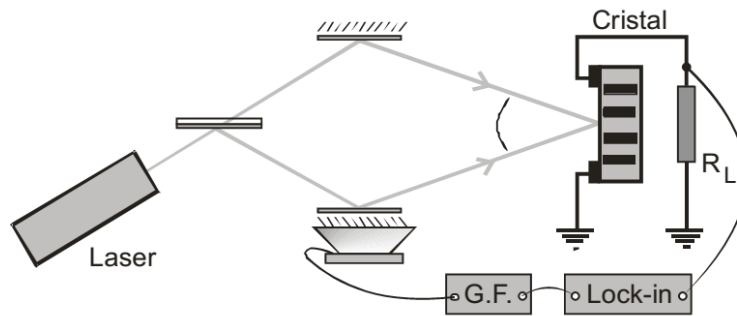


Fig. 2.7 Arreglo experimental para la detección de ondas ultrasónicas por medio de fuerza foto-electromotriz y de mezcla de dos ondas. Imagen tomada de [44].

2.2. Fotodiodos de Silicio

Los fotodiodos (*PD*) de silicio son dispositivos semiconductores que responden a la potencia de la radiación incidente de una longitud de onda entre 400 nm y 1100 nm , generando una corriente eléctrica proporcional a la potencia incidente. Los *PD* pueden ser calibrados para mediciones extremadamente precisas; desde intensidades menores de 1 pW/cm^2 hasta intensidades mayores de 100 mW/cm^2 [45].

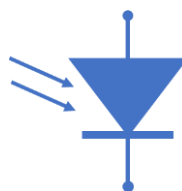


Fig. 2.8 Símbolo del fotodiodo

Los *PD* pueden ser clasificados por su función y construcción. Algunos ejemplos son: fotodiodo tipo PN, fotodiodo PIN, fotodiodo de avalancha

(APD), entre otros. Los PD encuentran un amplio uso en instrumentación analítica.

1.1.1. Principio de operación

Básicamente un *PD* es un diodo con unión *P-N*. Una unión *P-N* puede ser formada esparciendo impurezas *tipo-P* (ánodo); como Boro en una oblea de silicio *tipo-N* (cátodo); o esparciendo impurezas *tipo-N*; como fósforo en una oblea de silicio *tipo-P* [46]. Las impurezas originan electrones o huecos muy próximos a la banda de conducción y por tanto se requiere menor energía para excitar estos estados añadidos hasta la banda de conducción. En la Fig. 2.9 (a) se muestra la distribución de las capas.

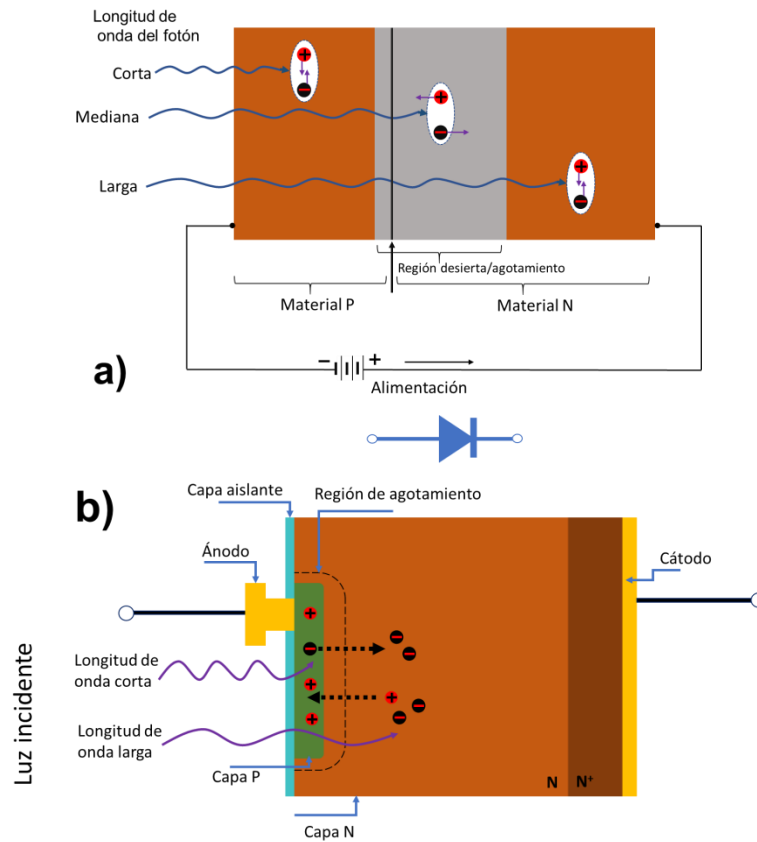


Fig. 2.9 Esquema de un fotodiodo. (a) representación gráfica de las diferentes capas. (b) construcción de un PD

La generación de pares electrón-hueco ocurrirá a varias profundidades; dependiendo de la energía de los fotones entrantes, así como de la naturaleza y grosor de los materiales (ver Fig. 2.9 (b)). La redistribución de los electrones y huecos entre las regiones N y P a través de las uniones, resulta en una región sin portadores libres, llamada región de agotamiento. Debido al esparcimiento de los electrones desde la región tipo-N a la región tipo-P y del esparcimiento de los huecos de la región tipo-P a la región tipo-N, se genera un voltaje (V_{in}). V_{in} , a través de la región de agotamiento, resulta en un campo eléctrico interno con un máximo en la región de agotamiento. Al polarizar inversamente el PD, aplicando un voltaje externo de polarización (V_{bias}), el campo eléctrico interno es más intenso, y por tanto la aceleración que experimentan los pares es mayor; mejorando la respuesta del fotodiodo

ante variaciones de la potencia óptica. Cualquier par generado por un fotón dentro de la región de agotamiento, se separará en direcciones opuestas; atraído por la combinación del V_{in} y del V_{bias} ; generando fotocorriente. Por otro lado, si se producen pares electrón-hueco fuera de la zona de agotamiento, tendrán una elevada probabilidad de recombinación, en cuyo caso no habrá fotocorriente disponible. La parte superior de la capa *tipo-P* debe ser lo más delgada posible y la zona de agotamiento tan ancha como sea posible para tener el máximo rendimiento cuántico.

Electrónicamente, un *PD* puede ser representado por una fuente de corriente en paralelo con un diodo ideal y otros dispositivos que se describen a continuación en la Fig. 2.10.

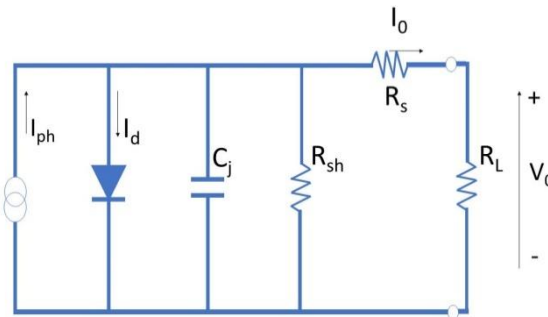


Fig. 2.10 Circuito equivalente de un fotodiodo

La fuente de corriente representa la corriente generada por la radiación incidente, y el diodo representa la unión N-P. Se tiene en paralelo una capacitancia de unión (C_j) y una resistencia dinámica (R_{sh}). C_j es directamente proporcional al área activa del *PD* e inversamente proporcional al ancho de la región de agotamiento, también es dependiente del V_{bias} .

Un *PD* ideal debe tener una R_{sh} infinita, y determina la corriente del ruido del *PD* sin V_{bias} . El modelo también presenta una resistencia en serie (R_s), el cual determina la linealidad del *PD* el modo fotovoltaico ($V=0$). En la Fig. 2.10

la resistencia de carga (R_L) es una resistencia externa que se conecta al PD para generar un voltaje de salida V_o .

Para poder describir cualquier PD , es necesario definir ciertos parámetros como el tiempo de subida/bajada, la respuesta en frecuencia, la respuesta espectral, la razón señal a ruido, y la velocidad de respuesta.

1.1.2. Tiempo de subida/bajada (t_r / t_f) y respuesta en frecuencia (f_{3dB})

El tiempo de subida (t_r) está definido como el tiempo de respuesta de la señal de un PD para llegar desde 10% a 90% de su valor respectivo al fotoestímulo instantáneo, por otro lado, el tiempo de bajada (t_f) es el tiempo de respuesta de la señal para llegar desde 90% a 10% del valor respectivo cuando la iluminación se ve interrumpida de manera abrupta [47,48]

La respuesta en frecuencia (f_{3dB}) es la frecuencia a la cual la salida del PD decrece 3 dB. El t_r / t_f y f_{3dB} pueden ser relacionados de la siguiente manera:

$$t_r = \frac{0.35}{f_{3dB}} \quad \text{Ec. 1.1}$$

1.1.3. Linealidad

La linealidad de un PD depende del tipo de fotodiodo y el circuito en el que opera. De manera general cuando la luz incidente está en un intervalo de 10^{-12} a 10^{-2} W, la linealidad que se obtiene es más grande que nueve ordenes de magnitud. La fotocorriente de un PD es extremadamente lineal con respecto al nivel de energía incidente [48–51]. El límite inferior de linealidad está determinado por la potencia equivalente al ruido (NEP), mientras que el límite superior depende de la R_L , el V_{bias} , entre otros factores externos.

1.1.4. Ruido

Como otros tipos de fotosensores, las características de ruido determinan los límites inferiores de la detección de energía. En un *PD* se presentan principalmente dos tipos de ruido: el ruido de disparo (*shot noise*) y el ruido térmico (*Johnson noise*) [48,52]

El ruido de disparo está relacionado con las fluctuaciones estadísticas tanto en la fotocorriente como en la corriente oscura. Es la fuente de corriente que domina cuando el *PD* opera en el modo fotoconductor. La magnitud del ruido de disparo está expresado como la raíz de la cuadrática media (*RMS*) de la corriente por ruido:

$$I_{sn} = \sqrt{2q(I_p + I_D)\Delta f}, \quad \text{Ec. 1.2}$$

donde q es la carga del electrón, I_p es la corriente fotogenerada, I_D es la corriente oscura y Δf es ancho de banda de la medición del ruido.

Por otro lado el ruido térmico es la corriente de ruido dominante en el modo fotovoltaico. Todas las características de un *PD* son afectadas por el cambio en temperatura. Estas incluyen la R_{Sh} , la corriente oscura, el voltaje de ruptura y en menor medida parámetros como la capacitancia [48,51]. La magnitud de la corriente generada por el ruido es:

$$I_{jn} = \sqrt{\frac{4k_B T \Delta f}{R_{SH}}}, \quad \text{Ec. 1.3}$$

donde $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$, es la constante de Boltzman, T es la temperatura absoluta en Kelvin, Δf es ancho de banda de la medición del ruido, R_{SH} es la resistencia dinámica del *PD*.

La corriente por ruido de los *PD* es la suma del ruido térmico de un resistor el cual se aproxima a la R_{Sh} y el ruido de disparo, resultado de la corriente oscura y la fotocorriente:

$$I_{tn} = \sqrt{I_{sn}^2 + I_{fn}^2} \quad \text{Ec. 1.4}$$

La potencia equivalente al ruido (*NEP*) es la cantidad de energía incidente en un *PD*, el cual genera una fotocorriente igual a la corriente por ruido y está definida de la siguiente manera:

$$NEP = \frac{I_{tn}}{R_\lambda} [W/\sqrt{Hz}], \quad \text{Ec. 1.5}$$

donde R_λ es la sensibilidad radiante o fotosensibilidad en A/W y I_{tn} es el ruido total del *PD*. Los valores *NEP* en un *PD* pueden variar desde $10^{-11} W/\sqrt{Hz}$ para áreas activas muy grandes de los fotodiodos, hasta $10^{-15} W/\sqrt{Hz}$ para áreas activas muy pequeñas de algunos fotodiodos.

Capítulo III

3. Diseño experimental

Para el desarrollo del trabajo se utilizaron diferentes equipos y componentes. En este capítulo se describe el equipo, diseño y la implementación del sistema optoelectrónico para la detección de ondas ultrasónicas en aire usando la técnica de la deflexión del haz.

3.1. Equipo

En esta sección se describen los equipos y dispositivos que conforman el sistema optoelectrónico de detección; se mencionan sus características y en ciertos casos, se detallan las caracterizaciones que se realizaron.

3.1.1. Láser Nd: YAG

El láser empleado para generar las ondas ultrasónicas en metal es un láser pulsado de Nd: YAG (*Neodimio: Granate de itrio y aluminio*) de la marca *Quantel*, modelo *Brilliant*. Nominalmente produce pulsos de 10 ns de duración con energía de 800 mJ por pulso y un perfil del frente de onda cuasi-Gaussiano a una longitud de onda de emisión de 1064 nm . Debido al uso del láser (aproximadamente 15 años de uso) actualmente se estima que la energía por pulso es de $400 - 500\text{ mJ}$, y presenta un haz de salida bastante irregular. La operación puede ser de disparo sencillo (manual) o en repetición (10 Hz).

3.1.2. Láser de prueba

El haz utilizado para la detección de ultrasonido proviene de un diodo láser de la marca *Global Laser*, modelo *LDM115*, cuya emisión de acuerdo a las especificaciones del fabricante puede estar en el intervalo de 635 a 650 nm con una potencia aproximada de 5 mW . La longitud de emisión no fue medida ya que no es un parámetro importante.

Físicamente, el láser mide aproximadamente 70 mm de largo por 11 mm de diámetro. El perfil de emisión es elíptico, lo que significa que es astigmático, por lo que posee dos focos (uno horizontal y el otro vertical) como se observa en la Fig. 3.1. Adicionalmente, en el tubo de soporte del láser, tiene integrado una lente para enfocar el haz.

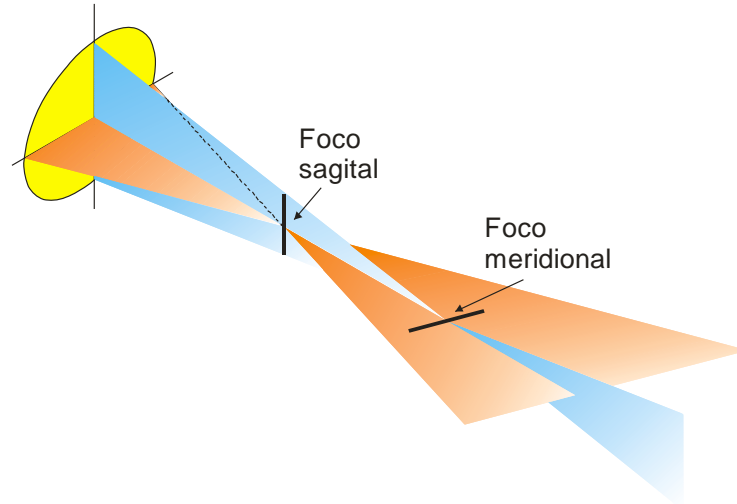


Fig. 3.1 Esquema del astigmatismo presente en el láser de prueba.

Dado que es importante enfocar el haz proveniente de este láser y cuidar de la orientación de la línea del foco, se caracterizó la cintura del haz en diferentes posiciones mediante la técnica de la navaja. Ya que originalmente se pensó en un sistema compacto y portable; se estableció que la distancia de la salida del láser al foco estuviera entre $15 - 20\text{ cm}$. La lente integrada al láser se ajustó manualmente a este intervalo y el tamaño del haz se midió en las dos orientaciones perpendiculares, como se muestra esquemáticamente en la Fig. 3.2.

Primeramente se caracterizó el foco horizontal, y en el mismo arreglo el láser se giró 90° para caracterizar el foco vertical. En una posición cercana al foco, la navaja se desplazó transversalmente al haz cada $25\ \mu\text{m}$, hasta llegar a cubrir toda el área transversal. Seguido de esto, la navaja se desplazó

longitudinalmente un centímetro (eje z), se realizó el proceso anterior y así sucesivamente.

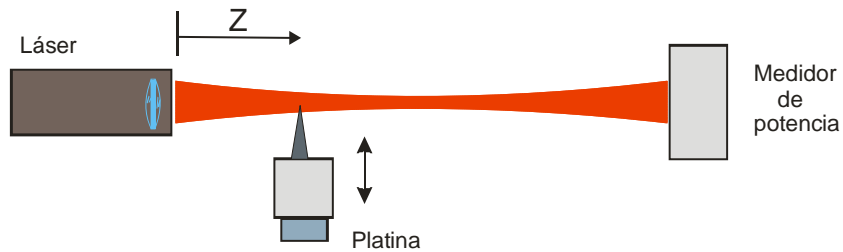


Fig. 3.2 Diagrama de la caracterización del láser de onda continua

La Fig. 3.3 muestra un resultado típico del muestreo transversal que permite determinar el diámetro del haz en una cierta posición. La curva de datos experimentales se ajustó con la función error; este ajuste entrega el valor del ancho del haz (w) para esa única posición.

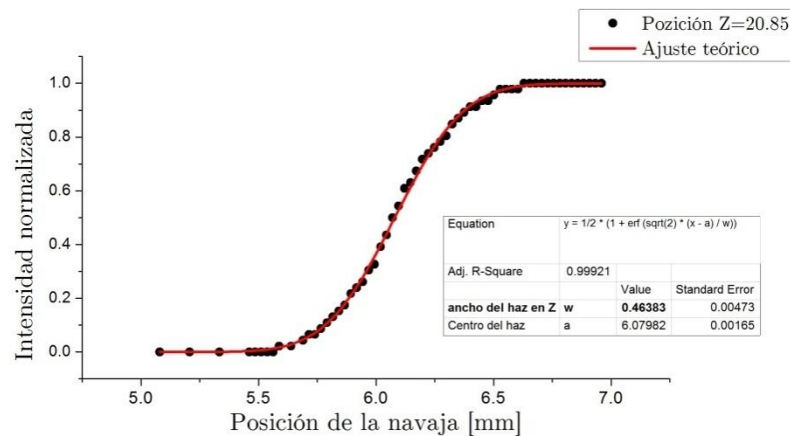


Fig. 3.3. Intensidad del haz en función de la posición transversal de la navaja en la posición 20.85 mm.

En la Fig. 3.4 se muestra el diámetro del haz en función de la distancia de la salida del láser (z). La posición en z es la distancia que hay entre la salida del láser a la navaja. De esta última Fig. 3.4 se puede observar que el diámetro mínimo del haz se produce a los 16 cm del láser, tanto para el eje

vertical como el horizontal. Sin embargo la profundidad de los focos es distinta, por lo tanto se elige el eje vertical o el eje menor, ya que, se sabe que, entre menor divergencia tenga el haz se tiene mayor intervalo para detectar las ondas ultrasónicas.

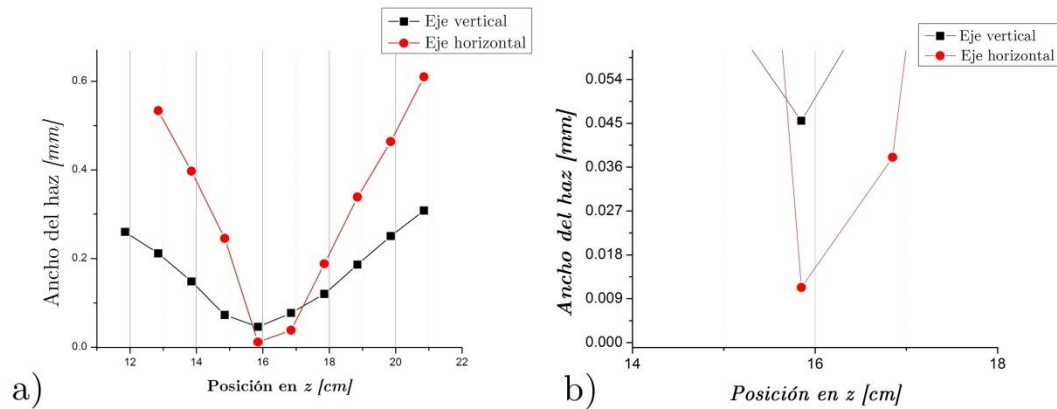


Fig. 3.4 a) Gráfica del tamaño del haz en función de la distancia de propagación a partir de la salida del láser, para cada eje (horizontal y vertical). b) Acercamiento de los puntos más profundos en z=16 cm

Con esta caracterización se llega a la conclusión que el haz del láser debe viajar unos 16 cm hasta donde se produce la perturbación ultrasónica y la orientación adecuada es el haz vertical.

3.1.3. Osciloscopio

Este dispositivo nos permite visualizar y almacenar las señales ultrasónicas detectadas. Es de la marca Tektronix, de la serie *MSO2000B*, con una impedancia de entrada de $1M\Omega$ y $25pF$. Tiene un ancho de banda ajustable de 200 o de 60 MHz y un muestreo de 1 GS/s. Permite grabar señales ya sea en promedio o de disparo sencillo.

3.1.4. Circuito detector

El diseño, la fabricación y caracterización se realizó en las instalaciones del *INAOE*. Para la realización de este circuito detector se tomó en cuenta la teoría antes descrita en la sección 2.2.4.

El diagrama electrónico se describe en la Fig. 3.5. Se tiene un fotodiodo bi-segmentado en modo fotoconductor. Cada segmento es un fotodiodo y están interconectados a otros elementos electrónicos de la siguiente manera:

La corriente que se genera debido a la llegada de fotones al fotodetector, pasa por la resistencia de carga y esto genera un voltaje. El voltaje generado transita por un filtro pasivo pasa-altas. De la salida del filtro pasa-altas, sigue por un amplificador operacional que amplifica 10 veces la señal y además está configurado como filtro pasa-bajas con retroalimentación negativa y filtraje. La señal de salida de cada filtro activo ingresa a un amplificador diferencial para hacer una comparación entre las señales de cada segmento. La señal final entra a un osciloscopio para analizarla.

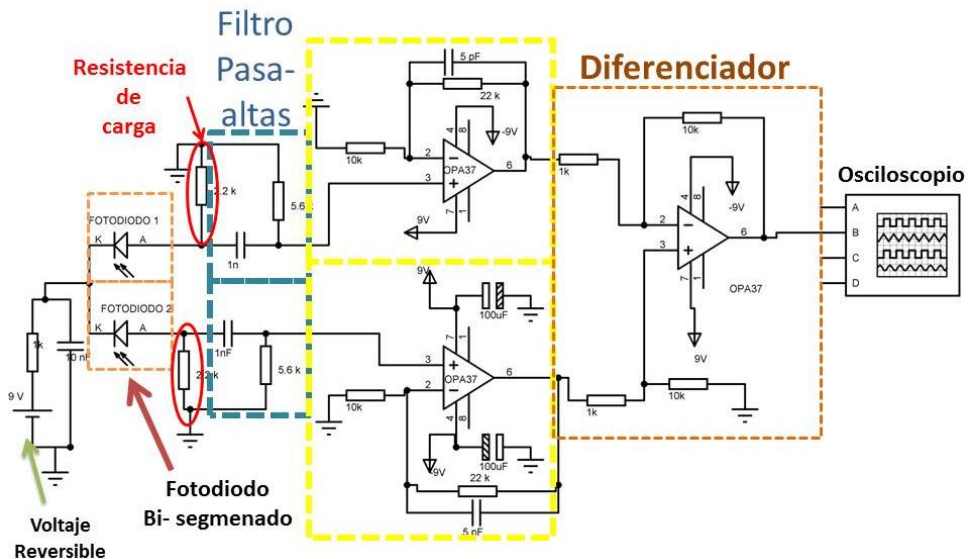


Fig. 3.5 Diagrama electrónico del circuito detector

El circuito fue implementado en placa PVC (Fig. 3.6) con asesoría del *Laboratorio de Visión por Computadora (LVC)* en el *INAOE*. Se decidió hacer el circuito en dos niveles para tener mayor control en el diseño de las pistas y disminuir ruido.

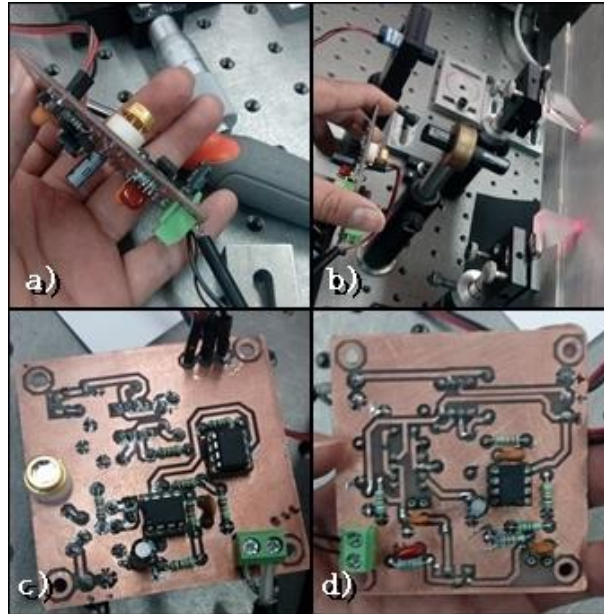


Fig. 3.6 Manufacturación del circuito detector. a) perfil del circuito. b) montaje del diseño. c) lado superior. d) lado inferior

Respuesta en frecuencia

Una vez implementado físicamente el circuito, se caracterizó la respuesta en frecuencia del circuito detector.

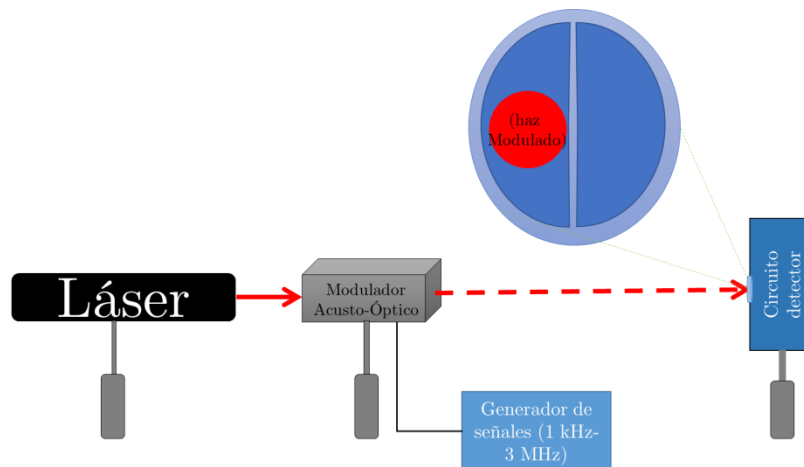


Fig. 3.7 Esquema de la caracterización en frecuencia.

Para hacer la caracterización en frecuencia se utilizó un modulador acusto-óptico (MAO), un láser *He-Ne*, un generador de señales y el circuito detector diseñado. Primero se caracterizó el MAO con un detector de silicio comercial cuya respuesta es lineal hasta 10 MHz , se encontró que el MAO tiene una respuesta en frecuencia lineal hasta aproximadamente 1.5 MHz , obteniendo la siguiente Fig. 3.8. Los datos de la figura fueron normalizados, para encontrar fácilmente el valor de la frecuencia de corte.

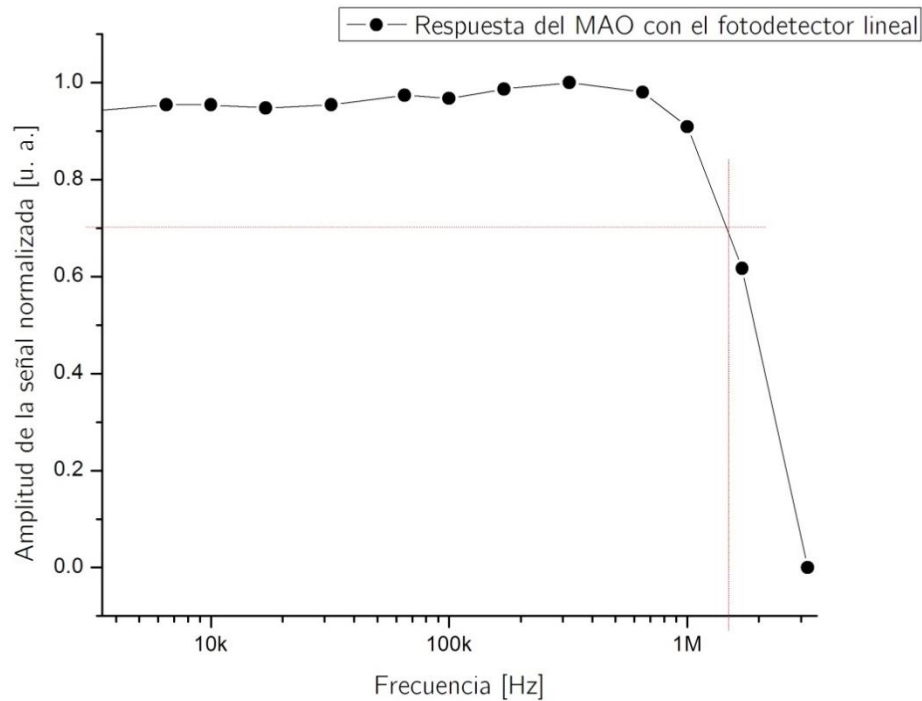


Fig. 3.8 Respuesta lineal del MAO utilizando un fotodetector lineal de alta frecuencia

Una vez caracterizado el MAO, se moduló en amplitud el haz del láser He-Ne por medio del MAO con el arreglo ilustrado en la Fig. 3.7. El haz modulado en amplitud se hizo incidir en un sólo segmento del fotodiodo y se varió la frecuencia desde unos cuantos Hz hasta llegar a $3 MHz$. La respuesta se ilustra en la Fig. 3.9.

Se puede observar el que el circuito detector actúa como un filtro pasa-bandas debido a que bloquea las frecuencias menores de $25 kHz$ y frecuencias mayores a $900 kHz$, aproximadamente. La respuesta pasa-bandas es de gran utilidad para la restricción de señales no deseadas provenientes a vibraciones de la mesa o ruido de la línea. Con este circuito se pueden detectar señales con anchos temporales de hasta $1 \mu s$.

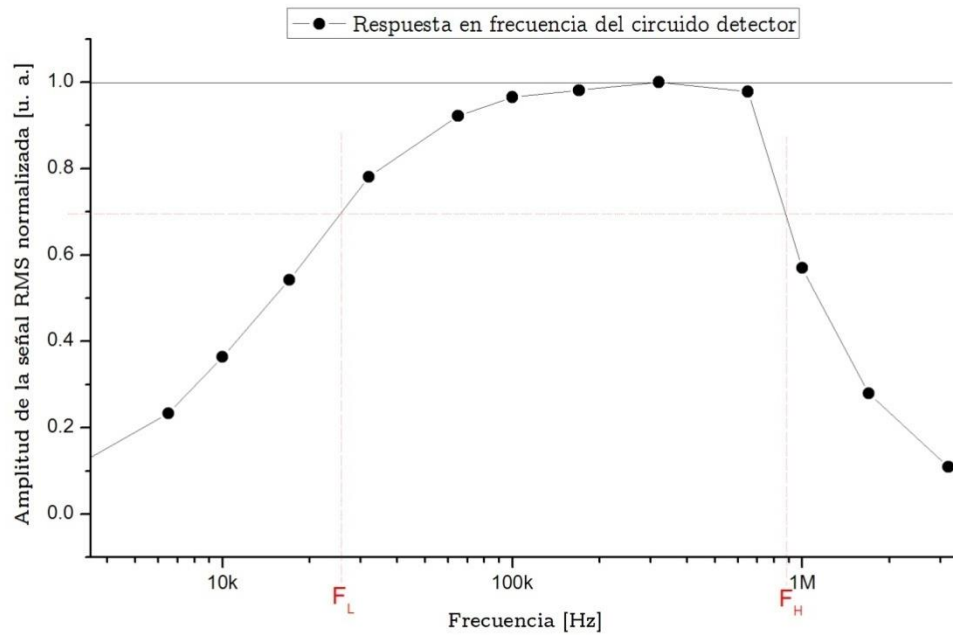


Fig. 3.9 Respuesta en frecuencia del circuito detector.

Ruido

Otra de las caracterizaciones realizadas al circuito detector fue la relación del ruido contra la posición horizontal del haz de incidencia. Para realizar esta caracterización, se montó el circuito en el sistema optoelectrónico detector mostrado en la Fig. 3.10. Se hizo incidir el haz de onda continua en medio de las dos secciones del fotodiodo, observando la amplitud *RMS* del ruido producido por el mismo sistema, seguido de esto, se desplazó el circuito de tal manera que un segmento del fotodiodo estuviera más iluminado que el otro.

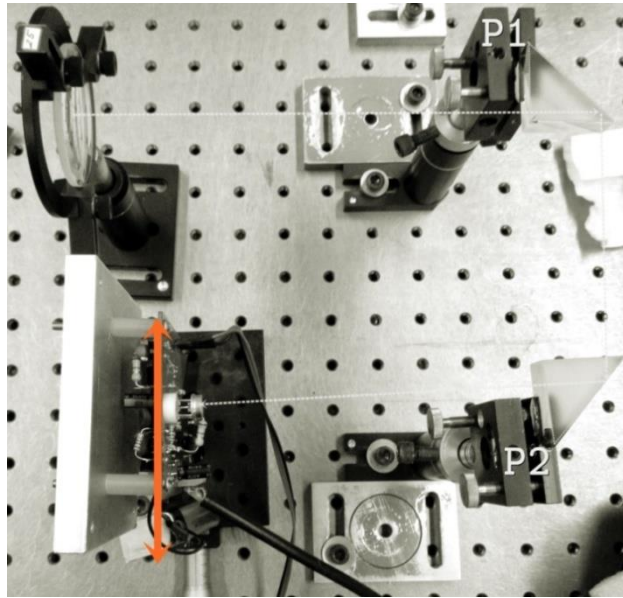


Fig. 3.10 Montaje del sistema optoelectrónico.

En la Fig. 3.11 se muestra la relación entre el ruido del sistema y la posición horizontal del haz incidente. Es evidente que la amplitud *RMS* del ruido es mayor cuando un segmento del fotodiodo es más iluminado que el otro, y el ruido es menor cuando los dos tienen una iluminación igual ya que el ruido común se cancela cuando el haz es simétrico.

Esta caracterización sirve para ver la cantidad de ruido existente en el sistema y se utilizará para encontrar la relación señal a ruido del mismo. Se observa que existe un ruido de 1.76 mV

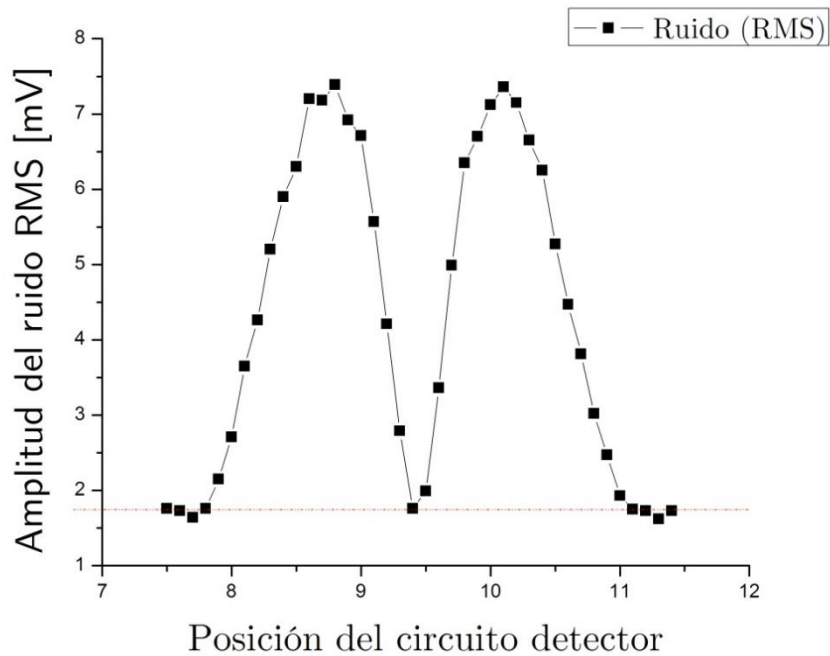


Fig. 3.11 Relación entre la posición del circuito detector y la amplitud del ruido.

3.2 Esquema Experimental

En la Fig. 3.12 se muestra el esquema experimental del sistema generador de ondas ultrasónicas en muestras solidas mediante un láser pulsado y el sistema detector basado en la deflexión del haz en el aire.

La onda ultrasónica fue generada mediante un pulso del láser de Nd: YAG en la cara anterior de una muestra metálica. La muestra seleccionada fue una placa de aluminio de 40cm X10cm X 9.75mm (largo, ancho y espesor). El diámetro del haz al incidir en la placa de aluminio fue de aproximadamente 8 mm, por lo que el régimen de generación de ondas ultrasónicas fue el termo-elástico. No se observó ningún daño en la placa en los primeros disparos.

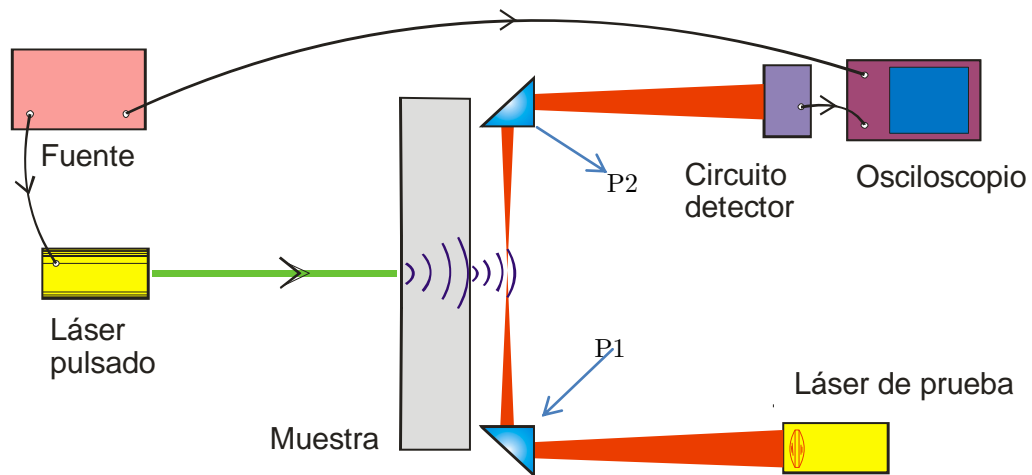


Fig. 3.12 Esquema del arreglo experimental

El haz del láser de prueba de onda continua incide normalmente en una cara del prisma triangular recto, (P_1), muy cerca de su vértice, de tal manera que el haz se refleje internamente y se transmita muy cerca de la superficie posterior de la placa de aluminio. El haz saliente del P_1 viaja unos centímetros y es perturbado por la onda de choque generada por la onda ultrasónica en la interfaz de la cara posterior de la placa de aluminio y el aire. El haz ya perturbado por esta onda de choque, incide normalmente, muy cerca de un vértice del prisma 2 (P_2); este haz se refleja internamente y se transmite directo al circuito detector. En condiciones estacionarias (es decir sin la perturbación de la onda de choque). El haz incide justo en medio del fotodiodo segmentado, de tal manera que cuando la trayectoria del haz se ve perturbado por la onda de choque en el aire, el haz se mueve y el circuito detector registrará el movimiento generando una señal eléctrica proporcional al desplazamiento del haz. La señal eléctrica detectada es registrada y almacenada por el osciloscopio para su posterior análisis.

Capítulo IV

4. Caracterización de materiales

En esta sección se detallan los resultados obtenidos en todo el proceso de investigación, mostrando las gráficas más representativas obtenidas con el sistema detector de ondas ultrasónicas.

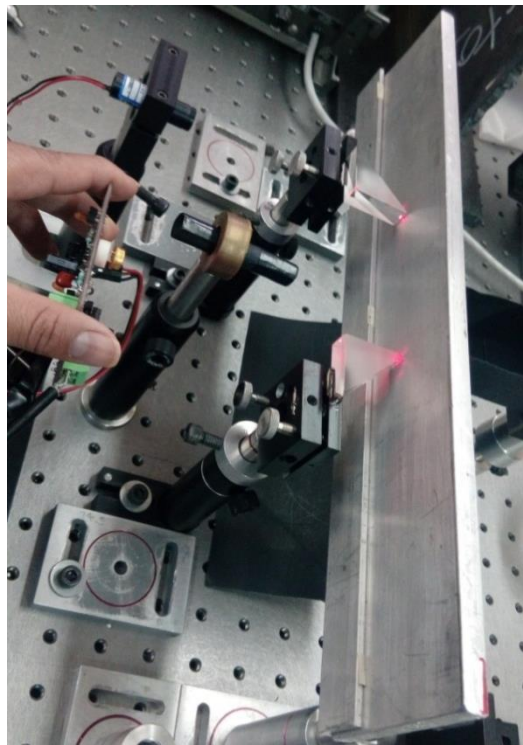


Fig. 4.1 Montaje del experimento en la mesa óptica

Se realizó el siguiente esquema: se hizo impactar un pulso de láser Nd: YAG en una placa de aluminio sin defecto, lo cual provocó una onda ultrasónica que viajó a través del material; del otro lado de la placa de aluminio se colocó el sistema optoelectrónico detector de ultrasonido que, sincronizado con el láser pulsado, registró la señal ultrasónica con el osciloscopio, el cual arroja

una señal similar a la Fig. 4.2; donde el primer pico es la perturbación creada por el ultrasonido que se transmite del aluminio al aire y los picos restantes son las reflexiones de la misma onda.

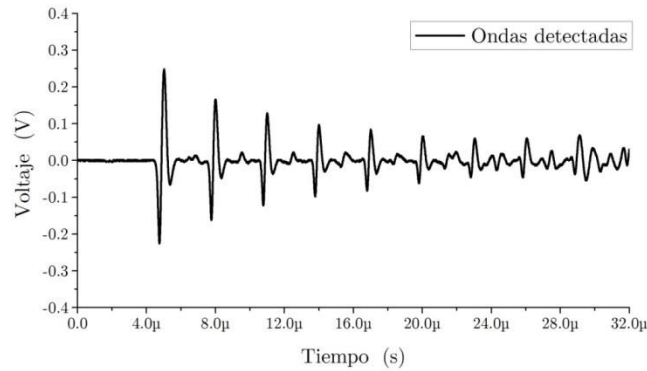


Fig. 4.2 Señal promedio de ultrasonido registrada por el osciloscopio proveniente de una muestra de aluminio sin defecto.

La señal registrada, observada en la Fig. 4.2, es el resultado del promedio de 4 señales provocadas por 4 pulsos de láser; esto quiere decir que se enviaron cuatro pulsos ópticos seguidos hacia el aluminio lo cual provocó ondas ultrasónicas que, del otro lado, interactuaron con el láser de onda continua perturbando su trayectoria. Finalmente el osciloscopio registró las cuatro distintas perturbaciones en forma de señales, que posteriormente promediaron.

Para poder estudiar el interior de placas de aluminio es necesario caracterizar una placa de aluminio sin defectos para poder establecer las condiciones adecuadas para una caracterización estándar, así como obtener datos relevantes como la velocidad del ultrasonido en este tipo de material en específico.

4.1. Aluminio sin defecto

En la sección anterior se describió el montaje del experimento en una mesa óptica, al igual que se describió todo el proceso para obtener las señales

aquí presentadas. En esta sección se ahondará más sobre los resultados de las señales producidas por el aluminio sin defecto.

Se hicieron dos tipos de pruebas con el material sin defectos para establecer cuál sería la manera idónea para obtener señales con una buena razón señal a ruido. La primera prueba se le realizó al esquema experimental descrito en la sección 3.2 al cual sólo se le hizo incidir un pulso óptico que produjo ondas ultrasónicas y señales. El resultado se muestra en la Fig. 4.3.

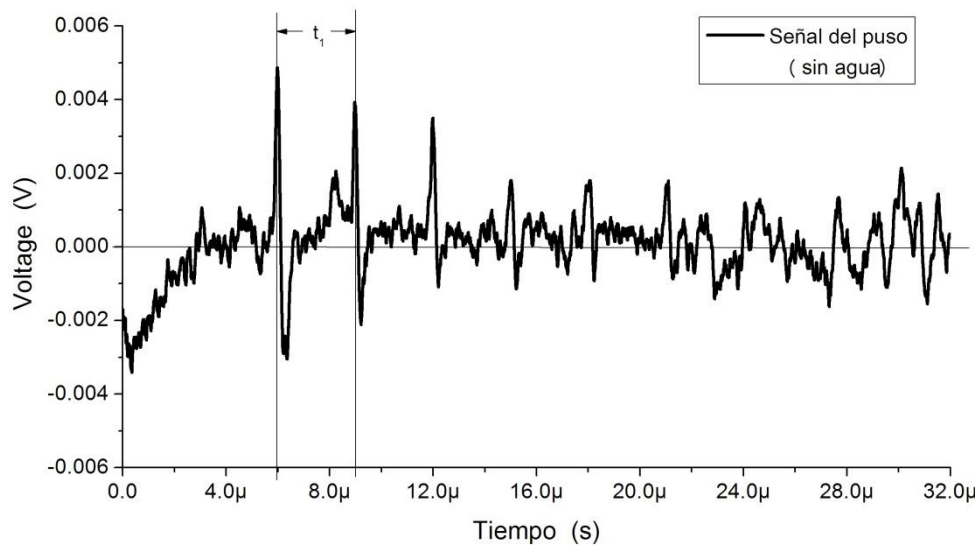


Fig. 4.3 Señal de la muestra de aluminio sin defecto

Como se puede observar, la señal contiene mucho ruido a pesar de que el circuito fue diseñado con un ancho de banda que discrimina las frecuencias de la línea. Utilizando la Ec. 4.6 se obtuvo una razón señal a ruido (SNR) de 13.22 dB y el tiempo entre ecos registrados fue de $3 \mu\text{s}$.

$$SNR(dB) = 10 \log \left(\frac{\text{amplitud}_{\text{señalRMS}}}{\text{amplitud}_{\text{ruidoRMS}}} \right)^2$$

Ec. 4.1 Razón señal a ruido (SNR)

Para evitar las señales con mucho ruido, se humedeció la placa de aluminio con unas gotas de agua, lo cual no sólo aumentó significativamente la señal, sino que se obtuvo una $SNR = 20 \text{ dB}$.

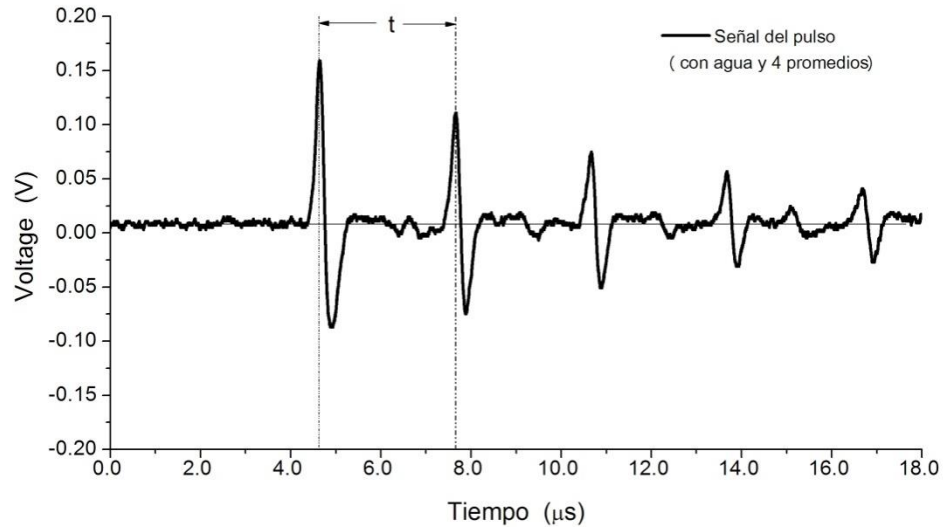


Fig. 4.4 Señal promedio de una muestra sin defecto con una capa de agua.

Si se sabe que el espesor de la placa de aluminio es de 9.75 mm y que el tiempo entre ecos es de $3 \mu\text{s}$, se obtiene la velocidad del ultrasonido en este tipo de aluminio de $v = 6489.34 \frac{m}{s}$ usando la Ec. 4.2

$$v = \frac{2e}{t}$$

Ec. 4.2 Velocidad del ultrasonido en una placa

donde: $e = 9.75 \text{ mm}$ es el espesor y $t = 3 \mu\text{s}$ es el tiempo.

La velocidad obtenida concuerda muy bien con los valores ya publicados [53,54]

4.2. Aluminio con defecto

Una vez caracterizado el detector de ultrasonido con un material sin defecto aparente, se procedió a crear un defecto a otra placa del mismo tipo de

aluminio de la siguiente manera: se le realizó una perforación de unos cuantos milímetros de diámetro entre el espesor de la placa sin cuidar la posición del defecto y posterior a eso se colocó en la misma posición que la placa anterior; entre el láser pulsado y el sistema detector.

Se le hicieron incidir cuatro pulsos ópticos, registrando las perturbaciones generadas por estos. Las cuatro señales se promediaron obteniendo la Fig. 4.5.

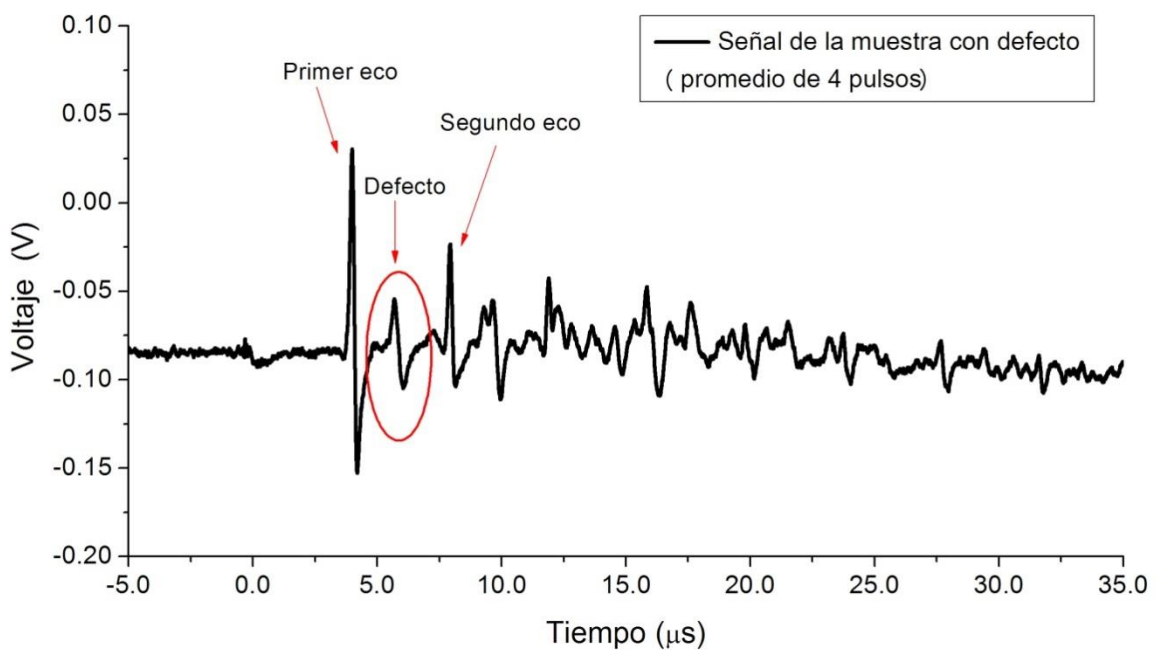


Fig. 4.5 Señal promedio obtenida de una placa de aluminio con defecto

En la figura se puede observar claramente la señal obtenida debido al defecto generado en el metal, ya que se encuentra entre dos distintos ecos.

Conociendo la velocidad del ultrasonido en este tipo de aluminio ($v = 6489.34 \frac{m}{s}$) y el tiempo entre ecos ($t = 3.94 \mu s$), se puede obtener el grosor de la placa despejándolo de la Ec. 4.2, dando como resultado $e = 12.78 \text{ mm}$ para esta placa con defecto. Además de conocer el grosor de la placa también se

pudo conocer la profundidad del defecto de la siguiente manera: se obtuvo el tiempo de vuelo entre el defecto aparente con el primer eco ($t= 1.96 \mu s$) para después despejar la variable del espesor en la Ec. 4.2; obteniendo un grosor de 5.48 mm ; esto quiere decir que el defecto está a esa profundidad de la superficie.

Conclusiones y futuros prospectos

En esta tesis se realizó el diseño e implantación de un sistema optoelectrónico compacto para detectar ondas ultrasónicas en el aire mediante la técnica de deflexión de haz.

La generación de ultrasonido en una placa de aluminio se llevó a cabo en el régimen termoelástico. De hecho el haz incidente en la placa no fue enfocada, teniendo un diámetro de unos 8 mm en la superficie de la placa. No se observó daño alguno.

El sistema detector diseñado y construido (fotodiodo segmentado y circuito electrónico) tiene un filtro pasa-bandas debido a que bloquea las frecuencias menores de 25 KHz y frecuencias mayores a 885 kHz , aproximadamente. Esto es de gran utilidad para la restricción de ultrasonido, debido a que se bloquean frecuencias bajas provenientes a vibraciones de la mesa o ruido de la línea. Con este circuito se pueden detectar señales con anchos temporales de hasta $1 \mu\text{s}$. Se pudo lograr una razón señal a ruido en nuestras mediciones del orden de 20 dB .

Experimentalmente observamos que la sensibilidad del sistema detector aumenta conforme el haz de prueba pasa muy cercano y paralelo a la superficie posterior. La distancia de separación haz de prueba –superficie posterior fue del orden de 1 mm para obtener resultados óptimos. Adicionalmente el foco del haz de prueba debe ajustarse de tal manera que coincida con el punto de generación de la onda de choque.

Los experimentos aquí mostrados se realizaron colocando todos los elementos en una mesa óptica. Una vez establecidas las dimensiones del sistema detector se ha propuesto la construcción de un sistema portátil y compacto de detección de ultrasonido utilizando la técnica de la deflexión del haz con componentes de mayor calidad para poner a prueba el diseño fuera del laboratorio. Un primer prototipo se muestra en la siguiente Fig. 5.1.

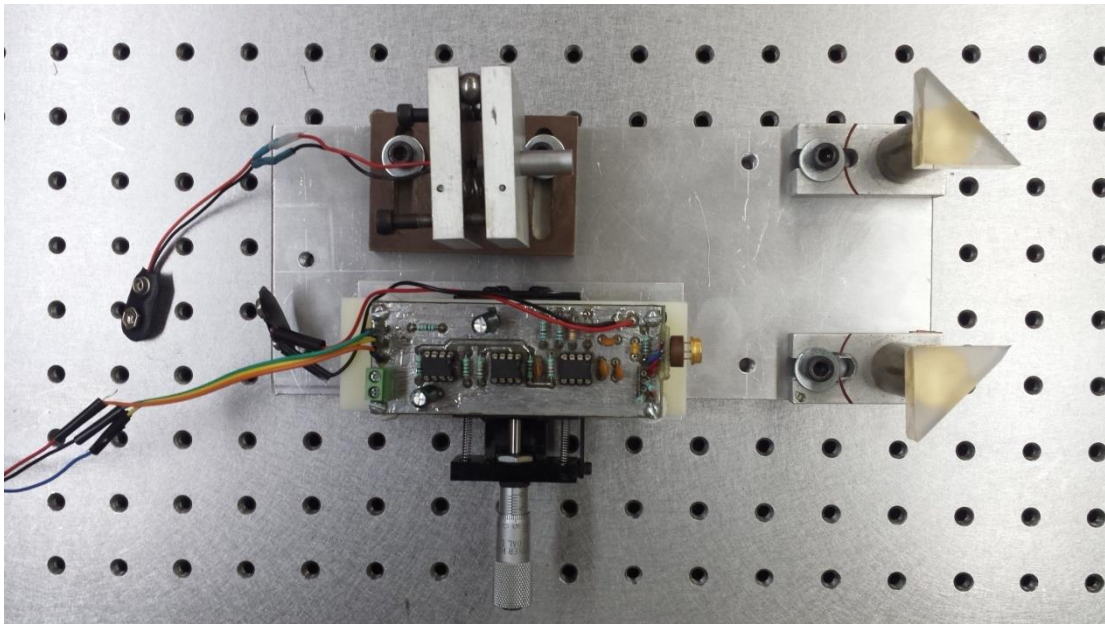


Fig. 5.1 Prototipo de un sistema portátil y compacto de detección de ultrasonido utilizando la técnica de la deflexión del haz

Lista de tablas y figuras

Fig. 1.1 Esquema de diferentes interferómetros para la detección de ondas ultrasónicas. (a) Interferómetro de Michelson (b) Interferómetro de velocidad, y (c) Interferómetro diferencial.	9
Fig. 1.2 Esquema del diseño del detector de ultrasonido propuesto por James N. Caron et al. Imagen tomada de [32].	10
Fig. 2.1 Diagrama de la generación de ondas ultrasónicas	16
Fig. 2.2 Régimen Termoelástico: A potencias bajas se produce calentamiento, ondas térmicas y ondas elásticas (ondas ultrasónicas).....	17
Fig. 2.3 Régimen Abrasivo.....	18
Fig. 2.4 Figura de un interferómetro de Michelson utilizado para detectar ondas ultrasónicas.	20
Fig. 2.5 Esquema de a técnica de la navaja	21
Fig. 2.6 a) Gráfico de la característica de bloqueo dependiente de la frecuencia del filtro de luz. Imagen tomada de [43] b) Diagrama esquemático del detector ultrasónico [43]: La luz dispersada contiene las frecuencias de luz que va de $f_L + \Delta f$ a $f_L - \Delta f$ donde en f_L es la frecuencia de la luz láser y Δf la frecuencia que cambia debido al efecto Doppler hacia arriba y hacia abajo a lo largo de la escala de frecuencia.....	22
Fig. 2.7 Arreglo experimental para la detección de ondas ultrasónicas por medio de fuerza foto-electromotriz y de mezcla de dos ondas. Imagen tomada de [44].	23
Fig. 2.8 Símbolo del fotodiodo	24
Fig. 2.9 Esquema de un fotodiodo. (a) representación gráfica de las diferentes capas. (b) construcción de un PD	25
Fig. 2.10 Circuito equivalente de un fotodiodo	26
Fig. 3.1 Esquema del astigmatismo presente en el láser de prueba.....	31
Fig. 3.2 Diagrama de la caracterización del láser de onda continua.....	32

Fig. 3.3 Intensidad del haz en función de la posición transversal de la navaja en la posición 20.85 mm.	32
Fig. 3.4 a) Grafica del tamaño del haz en función de la distancia de propagación a partir de la salida del láser, para cada eje (horizontal y vertical).b) Acercamiento de los puntos más profundos en z=16 cm	33
Fig. 3.5 Diagrama electrónico del circuito detector	34
Fig. 3.6 Manufacturación del circuito detector. a) perfil del circuito. b) montaje del diseño. c) lado superior. d) lado inferior	35
Fig. 3.7 Esquema de la caracterización en frecuencia.....	36
Fig. 3.8 Respuesta lineal del MAO utilizando un fotodetector lineal de alta frecuencia	37
Fig. 3.9 Respuesta en frecuencia del circuito detector.	38
Fig. 3.10 Montaje del sistema optoelectrónico.....	39
Fig. 3.11 Relación entre la posición del circuito detector y la amplitud del ruido.....	40
Fig. 3.12 Esquema del arreglo experimental	41
Fig. 4.1 Montaje del experimento en la mesa óptica.....	42
Fig. 4.2 Señal promedio de ultrasonido registrada por el osciloscopio proveniente de una muestra de aluminio sin defecto.....	43
Fig. 4.3 Señal de la muestra de aluminio sin defecto.....	44
Fig. 4.4 Señal promedio de una muestra sin defecto con una capa de agua	45
Fig. 4.5 Señal promedio obtenida de una placa de aluminio con defecto	46
Fig. 4.6 Prototipo de un sistema portátil y compacto de detección de ultrasonido utilizando la técnica de la deflexión del haz.....	49

Bibliografía

1. D. E. Chimenti, "Guided Waves in Plates and Their Use in Materials Characterization," *Appl. Mech. Rev.* **50**, 247 (1997).
2. T. W. Murray, A. Bakir, D. M. Stobbe, M. J. Kotelyanskii, R. A. Mair, M. Mehendale, X. Ru, J. D. Cohen, M. T. Schulberg, P. Mukundhan, and T. J. Kryman, "A New In-line Laser-based Acoustic Technique for Pillar Bump Metrology," *Int. Symp. Microelectron.* **2015**, 000486–000492 (2015).
3. J. Krautkrämer and H. Krautkrämer, *Ultrasonic Testing of Materials* (Springer Berlin Heidelberg, 1990).
4. I. G. Scott and C. M. Scala, "A review of non-destructive testing of composite materials," *NDT Int.* **15**, 75–86 (1982).
5. "Review of progress in quantitative nondestructive evaluation," *NDT Int.* **23**, 377 (1990).
6. K. Matsushima, H. Schimmel, and F. Wyrowski, "Fast calculation method for optical diffraction on tilted planes by use of the angular spectrum of plane waves," *J. Opt. Soc. Am. A* **20**, 1755 (2003).
7. Jun Xia and L. V. Wang, "Small-Animal Whole-Body Photoacoustic Tomography: A Review," *IEEE Trans. Biomed. Eng.* **61**, 1380–1389 (2014).
8. C.-C. Glüer, "Quantitative Ultrasound Techniques for the Assessment of Osteoporosis: Expert Agreement on Current Status," *J. Bone Miner. Res.* **12**, 1280–1288 (1997).
9. V. Giurgiutiu, A. Zagrai, and J. Jing Bao, "Piezoelectric Wafer Embedded Active Sensors for Aging Aircraft Structural Health Monitoring," *Struct. Heal. Monit.* **1**, 41–61 (2002).
10. D. M. Pepper, G. J. Dunning, M. B. Klein, G. D. Bacher, and P. V. Mitchell, "Advanced laser ultrasonic receivers for industrial applications," in *Technical Digest. Summaries of Papers Presented at the Conference on Lasers and Electro-Optics. Conference Edition. 1998 Technical Digest Series, Vol.6 (IEEE Cat. No.98CH36178)* (IEEE, 1998), pp. 358–359.
11. J.-P. Monchalín, C. Néron, J. F. Bussière, P. Bouchard, C. Padioleau, R. Héon, M. Choquet, J.-D. Aussel, G. Durou, and J. A. Nilson, "Laser-Ultrasonics: From the Laboratory to the Shop Floor," *Adv. Perform. Mater.* **5**, 7–23 (1998).
12. Link Industrial Measurement Systems, "UK government and industry to cooperate on ultrasonics project," *NDT Int.* **21**, 174 (1988).
13. T. Bosch, T. Bosch, M. Lescure, R. Myllyla, and M. Rioux, "Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement," *Opt. Eng.* **40**, 10 (2001).
14. N. Korneev, P. Rodríguez, and S. Stepanov, "Detection of in-plane components of laser-induced ultrasound in adaptive optical speckle configuration," *Opt. Eng.* **38**,

1014 (1999).

15. B. O'Driscoll, C. Smyth, A. C. Alting, R. W. Visschers, and V. Buckin, "Recent applications for high-resolution ultrasonic spectroscopy," *Am. Lab.* **35**, 54–57 (2003).
16. R. Hanke, T. Fuchs, and N. Uhlmann, "X-ray based methods for non-destructive testing and material characterization," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* **591**, 14–18 (2008).
17. J. A. Abbott, "Quality measurement of fruits and vegetables," *Postharvest Biol. Technol.* **15**, 207–225 (1999).
18. P. R. Teagle, "The quality control and non-destructive evaluation of composite aerospace components," *Composites* **14**, 115–128 (1983).
19. A. Nemet, "Technology transfer: a project to promote NDT in industry," *NDT Int.* **17**, 229–230 (1984).
20. C. B. Scruby, "Some applications of laser ultrasound," *Ultrasonics* **27**, 195–209 (1989).
21. C. B. Scruby and L. E. Drain, *Laser Ultrasonics: Techniques and Applications* (A. Hilger, 1990).
22. R. E. Green, "Non-contact ultrasonic techniques," *Ultrasonics* **42**, 9–16 (2004).
23. S. J. Davies, C. Edwards, G. S. Taylor, and S. B. Palmer, "Laser-Generated Ultrasound - Its Properties, Mechanisms and Multifarious Applications," *J. Phys. D. Appl. Phys.* **26**, 329–348 (1993).
24. J.-P. Monchalin, "Optical detection of ultrasound at a distance using a confocal Fabry–Perot interferometer," *Appl. Phys. Lett.* **47**, 14 (1985).
25. R. J. Dewhurst and Q. Shan, "Optical remote measurement of ultrasound," *Meas. Sci. Technol.* **10**, R139–R168 (1999).
26. a. Shoh, "Industrial Applications of Ultrasound -A Review I. High-Power Ultrasound," *IEEE Trans. Sonics Ultrason.* **22**, 60–71 (1975).
27. C. H. Palmer, R. O. Claus, and S. E. Fick, "Ultrasonic wave measurement by differential interferometry," *Appl. Opt.* **16**, 1849 (1977).
28. L. Noui and R. J. Dewhurst, "A laser beam deflection technique for the quantitative detection of ultrasonic Lamb waves," *Ultrasonics* **31**, 425–432 (1993).
29. S. Stepanov, P. Rodríguez, S. Trivedi, and C. C. Wang, "Effective broadband detection of nanometer laser-induced ultrasonic surface displacements by CdTe:V adaptive photoelectromotive force detector," *Appl. Phys. Lett.* **84**, 446–448 (2004).
30. R. K. Ing and J.-P. Monchalin, "Broadband optical detection of ultrasound by two-wave mixing in a photorefractive crystal," *Appl. Phys. Lett.* **59**, 3233 (1991).
31. R. J. Dewhurst, C. E. Edwards, A. D. W. McKie, and S. B. Palmer, "Comparative study of wide-band ultrasonic transducers," *Ultrasonics* **25**, 315–321 (1987).
32. J. N. Caron, Y. Yang, J. B. Mehl, and K. V. Steiner, "Gas-coupled laser acoustic

- detection at ultrasonic and audio frequencies," http://oasc12039.247realmedia.com/RealMedia/ads/click_lx.ads/www.aip.org/pt/adcenter/pdfcover_test/L-37/1301857289/x01/AIP-PT/MCL_RSIArticleDL_051717/MCL_banner.jpg/434f71374e315a556e61414141774c75?x (1998).
33. C. Hellier, *Handbook of Nondestructive Evaluation* (McGraw-Hill, 2013).
 34. Wikipedia contributors, "Ultrasound," <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ultrasound&oldid=788341813>.
 35. George A. Matzkanin, H. Thomas Yolken, AMMTIAC, and T. Austin, "A Brief Introduction to Precious Metals <http://ammtiac.alionscience.com> The AMMTIAC Quarterly, Volume 2, Number 3 Selecting a Nondestructive Testing Method, Part V: Ultrasonic Testing," *AMMTIAC Q.* **2**, 16 (2008).
 36. W. J. Staszewski, B. C. Lee, L. Mallet, and F. Scarpa, "Structural health monitoring using scanning laser vibrometry: I. Lamb wave sensing," *Smart Mater. Struct.* **13**, 251–260 (2004).
 37. Bruce Crouse, Gerry Frie, Joe Gray, Fred Kilpela, Brian Larson, Arnold Prosch, Angie Phillips, Mark Sabolik, Lester Schmerr, Randy Walbridge, Bill Wiley, and Sam Wormley, "NDT Resource Center," <https://www.nde-ed.org/SponsorsContributors/sponsorscontributors.htm>.
 38. S. Mellin and G. Nordin, "Limits of scalar diffraction theory and an iterative angular spectrum algorithm for finite aperture diffractive optical element design," *Opt. Express* **8**, 705 (2001).
 39. T. Požar, A. Babnik, and J. Možina, "From laser ultrasonics to optical manipulation," *Opt. Express* **23**, 7978 (2015).
 40. B. Mi and I. C. Ume, "Parametric Studies of Laser Generated Ultrasonic Signals in Ablative Regime: Time and Frequency Domains," *J. Nondestruct. Eval.* **21**, 23–33 (2002).
 41. J. P. Monchalin, "Optical detection of ultrasound at a distance using a confocal Fabry-Perot interferometer," *Appl. Phys. Lett.* **47**, 14–16 (1985).
 42. J.-P. Monchalin, "Optical detection of ultrasound," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* (ISSN 0885-3010), vol. UFFC-33, Sept. 1986, p. 485-499. **33**, 485–499 (1986).
 43. "Method and apparatus for receiving ultrasonic waves by optical means," (1977).
 44. P. R. Montero, *Detección Óptica de Ultrasonido Generado Por Láser Mediante Fotodetectores Adaptivos* (2011).
 45. R. Pallás Areny, *Sensores Y Acondicionadores de Señal* (Marcombo Boixareu, 2003).
 46. R. Pallás Areny, *Adquisición Y Distribución de Señales* (Marcombo Boixareu, 1993).
 47. J. M. Migueláñez García, *ELECTRÓNICA BÁSICA PARA TMA-S*, Segunda (Jose Manuel Migueláñez Garc, 2017).
 48. K. K. Hamamatsu Photonics, "Selection guide: Si photodiodes,"

<http://www.hamamatsu.com/us/en/search/index.html?spkey=&pq=photodiode&spfile=pdf#gsc.tab=0&gsc.q=photodiode&gsc.page=1>.

49. M. C. España Booquera, *Comunicaciones Ópticas: Conceptos Esenciales Y Resolución de Ejercicios* (Díaz de Santos, 2005).
50. "Glossary of Terms | OSI Optoelectronics," <http://www.osioptoelectronics.com/technology-corner/glossary-of-terms.aspx>.
51. "Photodiode Terminology | Optoelectronic Components | LEDs, Laser Diodes & Detectors | AP Technologies UK," <https://www.aptechnologies.co.uk/support/photodiodes/photodiode-terminology>.
52. osioptoelectronics, *Photodiode Characteristics and Applications* (n.d.).
53. "Sound Velocity Table | Ultrasonic Testing, NDT," http://www.classltd.com/sound_velocity_table.html.
54. "Material Sound Velocities | Olympus IMS," <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/thickness-gage/appendices-velocities/>.