مقاله

روش فراصوت لیزری در ارزیابی‌های غیرمخرب

محمدرضا چهره‌زاد، دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، گرایش ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
chehrezad.mr@gmail.com

فرهنگ هنرور، استاد دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، گروه ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
honarvar@kntu.ac.ir

چکیده

با گسترش علوم، لیزر وارد زمینه‌هایی گسترده‌تر از جمله دانش روبه رشد فراصوت[1] نیز شده است. امروزه روش‌های بازرسی فراصوتی به‌طور گسترده‌ای جهت ارزیابی‌های غیرمخرب مواد و قطعات گوناگون به‌کار می‌رود. ترکیب دو روش لیزر و فراصوت منجر به کشف روشی متفاوت در ارزیابی غیرمخرب قطعات با کاربردهای جدید و سودمند شده است. تولید امواج فراصوت توسط لیزر بدون نیاز به مادهٔ واسط می‌باشد و از طرف دیگر به‌کمک این روش می‌توان تمامی حالت‌های موج شامل امواج ریلی[2]، عرضی افقی، عرضی عمودی و طولی را تحریک کرد. لیزرهای پالسی می‌توانند منابع خوبی در سیستم فراصوت لیزری باشند. نمایان‌سازی نوری امواج فراصوتی، به‌طور کلی توسط تداخل‌سنجی و یا تجهیزات دیگر، جهت اندازه‌گیری جابه‌جایی سطح استفاده می‌شود.

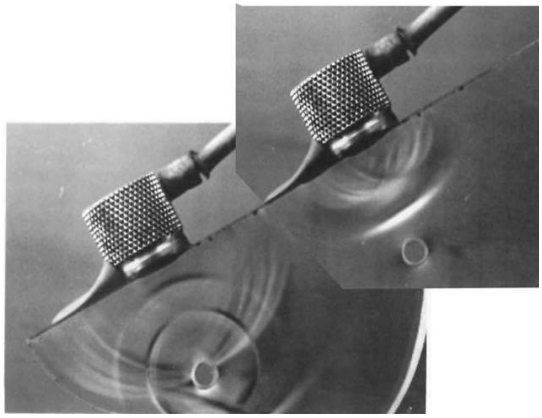
واژگان کلیدی: فراصوت، لیزر، ارزیابی غیرمخرب، تداخل‌سنجی

مقدمه

امواج فراصوتی، امواج صوتی با فرکانس بالا می‌باشند، به‌طوری‌که فرکانس ارتعاش آنها بالاتر از ۲۰۰۰۰ ارتعاش در هر ثانیه (هرتز) است؛ مقداری بیشتر از آستانهٔ شنوایی انسان. امواج صوتی می‌توانند در جامدات و سیالات انتشار یابند. در واقع، امواج با سرعت انتشار زیاد و میرایی کم در جامدات و سیالات نسبت به هوا انتشار می‌یابد. پدیدهٔ انتشار امواج در جامدات اساس و پایهٔ اصلی در ارزیابی غیرمخرب به‌روش فراصوتی است. با استفاده از مشخصات یک موج فراصوتی می‌توان به خصوصیات مواد از نظر ترکیب، ساختار، خواص الاستیک، چگالی، شکل هندسی و جز این‌ها دست یافت. همچنین با استفاده از امواج فراصوتی می‌توان عیوب و ترک‌های موجود در ماده را شناسایی و توصیف کرد. عیوب باعث پراش[3] امواج فراصوتی می‌شوند، همانند بازگشت امواجی که به یک سنگ ثابت برخورد می‌کنند (شکل ۱). این پراش به‌صورت یک اکو شناسایی می‌شود که با استفاده از ویژگی‌های آن می‌توان موقعیت، اندازه و شکل عیب را تعیین کرد [۲]. مشابه حرکت تمامی امواج، سرعت امواج فراصوتی از رابطهٔ سادهٔ ۱ به‌دست می‌آید:

(۱) فرکانس × طول موج = سرعت موج

پس از ایجاد امواج فراصوتی، هنگام انتشار امواج از محیطی به محیط دیگر، در صورتی‌که مقاومت صوتی[۴] هر دو محیط یکسان نباشند، بسته به مقدار مقاومت صوتی محیط‌ها، بر روی امواج فراصوتی حالت‌های متنوعی اتفاق می‌افتد. به‌عنوان نمونه زمانی‌که امواج از فولاد به‌داخل آب منتشر شوند، مقدار زیادی از امواج از مرز دو ناحیه به‌سمت محیط فولادی بازتابیده می‌شود و مقدار کمی از امواج از محیط فولاد به‌داخل آب عبور می‌کند.



شکل ۱. بازتاب امواج فراصوتی در برخورد با یک عیب دایره‌ای [۲]

با اختراع لیزر[۵]، در اوائل سال ۱۹۶۰ م، شاهد کاربردهای فراوان آن در عرصه‌های علمی و صنعتی بوده‌ایم. به‌طور کلی، امواج فراصوتی توسط ابزارهای خاصی تولید می‌شوند که عبارت‌اند از:

۱. تراگذارهای پیزوالکتریک[۶]
۲. تراگذارهای هوا - جفت[۷]
۳. تراگذارهای الکترومغناطیسی صوت[۸]
۴. لیزرهای پالسی

تولید امواج فراصوتی توسط لیزر به مادهٔ واسط نیاز ندارد، از طرفی با این روش می‌توان تمامی حالت‌های موج شامل امواج ریلی، عرضی افقی، عرضی عمودی و طولی را تحریک کرد [۴]. لیزر به‌عنوان یک منبع نوری دارای خصوصیات منحصر به‌فردی است؛ خصوصیاتی که آن را به ابزاری متمایز مبدل کرده است. این ویژگی عبارت است از توانایی تولید پرتوهای موازی با شدت زیاد از نور همدوس که دقیقاً طول موج آن تعریف شده است.

لیزرها را می‌توان با توجه به کاربرد، به حالت‌های پیوسته و یا پالسی (با طول پالس از میلی‌ثانیه تا پیکوثانیه)، و با طول موج‌هایی برابر مادون قرمز تا فرابنفش، ایجاد کرد. لیزرهای پالسی می‌توانند منابع خوبی در سیستم فراصوت لیزری باشند. سه سازوکار کلی تولید به‌کار گرفته می‌شود. تولید دما ارتجاعی (ترموالاستیک) به‌دلیل جذب نور توسط سطح و یا چندلایهٔ نانومتری اول، اتفاق می‌افتد. منطقهٔ حرارت‌دیده دچار انبساط دما ارتجاعی شده و یک موج صوتی سطح پایین ارسال می‌کند. امواج صوتی سطوح بالاتر با استفاده از تولید دما ارتجاعی، توسط اثر لغزش عدسی، لایه‌های اکسیدی و جز این‌ها، بر روی سطح ایجاد می‌شود. در این حالت، پرتو لیزر به‌خوبی در منطقهٔ مذکور جذب می‌شود. نهایتاً، اگر چگالی توان لیزر بیشتر شود، کاهیدگی اتفاق می‌افتد، که سبب به‌وجود آمدن امواج فراصوتی دامنه بالا می‌شود. این روش تا حدودی مخرب است و احتمالاً برای نمونه‌های خاصی کارآیی نداشته باشد [۸].

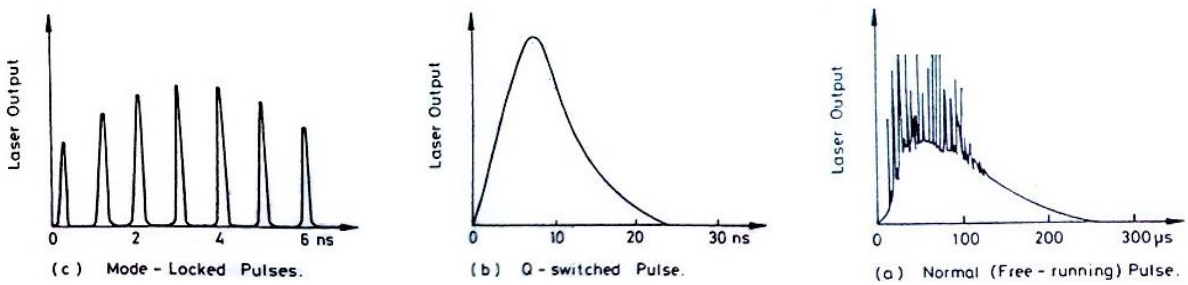
لیزرهای پالسی

لیزر وسیله‌ای برای تقویت نور است که پرتوهای پرشدت هدایت‌شده تولید می‌کند و فرکانس و طول موج منحصر به خود را دارد. از نظر محدودهٔ اندازه می‌تواند ده برابر کوچک‌تر از قطر تار موی انسان و یا به اندازهٔ یک ساختمان بسیار بزرگ باشد. از نظر محدودهٔ توان بین 10^{-9} الی 10^{20} وات، و از لحاظ محدودهٔ طول موج از میکروموج تا منطقهٔ طیفی اشعهٔ ایکس نرم و با دامنهٔ فرکانسی 10^{11} تا 10^{17} می‌باشد. انرژی پالس لیزرها بیش از 10^{4} ژول و طول مدت زمان پالس کمتر از 5×10^{-15} ثانیه می‌باشد [۶]. چهار فرایند اصلی برای تولید لیزر عبارت‌اند از [۵]:

۱. انتشار تحریک‌شده
۲. پمپاژ (تحریک توسط یک منبع خارجی)
۳. انتشار خودبه‌خودی
۴. جذب فوتون‌ها.

یک لیزر ساده، در صورتی‌که به‌عنوان مثال، توسط یک محفظهٔ جرقهٔ پالسی پمپاژ شود، تبدیل به حالت پالسی می‌شود. بسته به نوع لیزر، می‌توان پالس‌هایی با طول زمانی ۱۰۰ میکروثانیه الی ۱ میلی‌ثانیه ایجاد کرد. در این حالت کارکرد نرمال، پالس‌ها تمایلی برای متحدالشکل شدن ندارند، اما شامل ستون‌های با طول زمانی میکرومتر، تا آرام‌شدن نوسانات، می‌باشد (شکل ۲).

اگرچه پالس‌های پرانرژی می‌توانند با این روش تولید شوند، حالت نرمال برای فراصوت لیزری نامناسب می‌باشد؛ زیرا طول مدت زمان پالس بسیار بزرگ می‌باشد. با استفاده از یک روش دیگر، معروف به قطع و وصل Q، می‌توان به تولید پالس‌هایی در محدودهٔ ۱ الی ۱۰۰ نانوثانیه دست یافت (شکل ۲) [۱].



(ج) (ب) (الف)

شکل ۲. نمایش شماتیک پالس‌های حاصل از یک لیزر حالت جامد [۱]

فاکتور Q[۹] یک محفظهٔ تشدیدکنندهٔ برابر است با انرژی ذخیره‌شده در محفظهٔ تقسیم‌بندی شده با کاهش انرژی محفظه به ازای هر دور انتشار نور درون محفظه. بنابراین اگر Q کم باشد، از نوسانات محفظه ممانعت به‌عمل آمده و انرژی ذخیره‌شده در محیط لیزری افزایش می‌یابد. زمانی‌که Q زیاد باشد، محفظه می‌تواند نوسانات حاصل از انرژی تولیدشده از محفظه را حمایت کند [۱].

تولید و شناسایی فراصوت لیزر

اگرچه ارزیابی فراصوتی بر پایهٔ لیزر معایبی چون حساسیت کم، حساس به ارتعاشات، نیاز به تربیت کارگر ماهر، امکان صدمه‌دیدن قطعهٔ نمونه و هزینهٔ بسیار زیاد آن دارد، اما توانایی این روش در انجام ارزیابی قطعاتی که در فاصله‌های زیاد (چندین متر)، از تراگذارها قرار گرفته‌اند، ضرورت استفاده از این روش را در چنین شرایطی توجیه می‌کند. این روش از دو جزء اصلی تولید و شناسایی لیزر تشکیل شده است. این دو جزء گاهی به‌صورت ترکیبی در تراگذارها و ارزیابی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲]. ارزیابی غیرمخرب به روش فراصوت لیزری، به‌دلیل ویژگی غیرتماسی بودن آن، چند سالی است که به‌عنوان روشی مناسب و بی‌خطر برای محیط زیست مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تولید فراصوت لیزری

تولید امواج فراصوتی توسط لیزر در اثر تحریک موج با اصابت یک ضربه نوری می‌باشد. یک پرتو پالسی نوری پرانرژی (با طول موج حدوداً ۱ میکرومتر)، بر روی سطح نمونه متمرکز می‌شود. در طی فعل و انفعالات بین پالس نوری و نمونه یکی از دو فرایند، کاهنده[۱۰] و دمارتجاعی[۱۱]، اتفاق می‌افتد، که در هر دو به‌صورت جداگانه الگوی

منحصر به‌فردی از امواج فراصوتی تولید می‌شود. در انرژی‌های بالاتر و مواد جاذب انرژی، پالس نوری همانند انفجار موضعی، قسمتی از نمونه را می‌کَند و از سطح نمونه خارج می‌کند (شکل الف-۳).

در مقابل، در نورهای با چگالی انرژی پایین‌تر، با وجود و یا عدم وجود مواد کم‌جاذب[۱۲]، فعل و انفعالات میان پرتو و نمونه شدید نمی‌باشد. در این شرایط دماارتجاعی، انرژی نوری به‌سرعت به سطح ماده حرارت می‌دهد؛ این حرارت‌دهی توأم با سردشدن سریع در لحظهٔ پراکنده‌شدن انرژی است. پالس حاصل از انبساط و انقباض ماده، سبب روانه‌شدن موج فراصوتی می‌شود [۲].

علاوه بر اینکه تحریک کاهنده سبب آسیب سطحی نمونه می‌شود، تحریک دماارتجاعی و کاهندهٔ موج در میزان انرژی داده‌شده به موج و نوع موج و نیز الگوی جهت‌گیری ناحیهٔ دور[۱۳] با هم متفاوت‌اند. قسمت ب از شکل ۳ الگوی جهت‌گیری امواج عرضی و طولی را برای دو حالت کاهنده و دما ارتجاعی در تولید موج فراصوتی توسط لیزر نشان می‌دهد.

علاوه بر این، قسمت ج از شکل ۳ پاسخ‌های اندازه‌گیری‌شده در هر دو روش را در ارسال عبوری[۱۴]، توسط دریافت‌کننده‌ای که در طرف دیگر قطعه در صفحهٔ مقابل نقطهٔ تحریک‌شده قرار گرفته است، را نشان می‌دهد. این نوع پیکربندی بازرسی مرکز ارتعاشی نامیده می‌شود. علاوه بر این، هر دو روش موج صفحه‌ای مرزی وسیع تولید می‌کند [۲].

بازرسی فراصوت لیزری

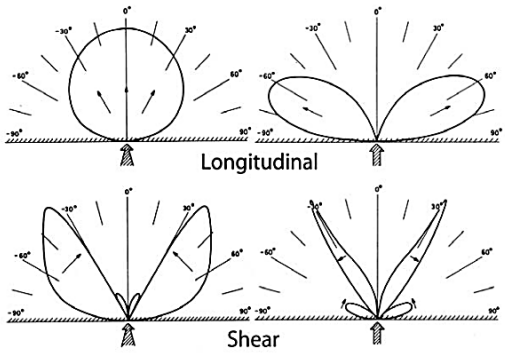
اصول سازوکار تولید و بازرسی لیزر با یکدیگر متفاوت است. گاهی امواج تولیدی توسط لیزر با استفاده از تراگذارهای EMAT و پیزوالکتریک بازرسی می‌شود. غالباً امواج فراصوتی توسط تجهیزات نوری اندازه‌گیری می‌شوند. روش‌های گوناگونی برای بازرسی لیزر وجود دارد. دو روش معمول عبارت است از: روش لبه چاقویی[۱۵] و تداخل‌سنج مایکلسون [۲].

روش لبه چاقویی تغییرات انحراف زاویه‌ای پرتو لیزر بازتابیده شده از سطح نمونه، در طی جابه‌جایی امواج روی سطح را نشان می‌دهد (شکل الف-۴). یک لبه چاقویی در مسیر موج بازتابیده قرار داده می‌شود. زمانی‌که سطح در حضور آشفتگی صوتی حرکت می‌کند، زاویهٔ بازتابش تغییر می‌کند و مقدار کم و یا زیادی از پرتو نوری توسط بلوک لبه چاقویی مسدود می‌شود. پره‌های تیغه‌ها معمولاً به‌عنوان لبه چاقویی استفاده می‌شود [۲].

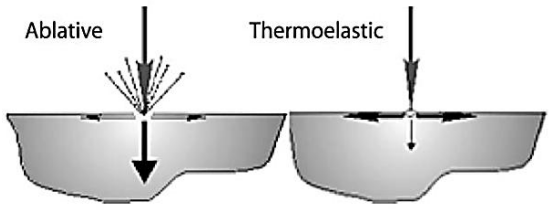
رایج‌تر از روش لبه چاقویی، روش تداخل‌سنجی مایکلسون است. این روش تداخل‌سنجی از حساسیت بالای تداخل نور استفاده می‌کند (شکل ب-۴). یک پرتوی لیزر به یک نیمه‌آینهٔ نقره‌اندود (جداساز پرتو) تابیده و به دو پرتو مجزا تقسیم می‌شود، که یکی از پرتوها بازتابیده شده و دیگری عبور داده می‌شود. یک پرتو به آینهٔ ثابت انعکاس داده می‌شود (پایهٔ مرجع) و پرتو دیگر بر نمونه (پایهٔ هدف).بعد از انعکاس، هر دو پرتو دوباره با یکدیگر ترکیب و توسط آشکارساز نوری دریافت می‌شود.

چون هر دو پرتو از یک پرتو سرچشمه گرفته‌اند، همدوس بوده و در آشکارساز، تداخل سازنده و ویرانگر خواهند داشت. درجهٔ سازنده و ویرانگربودن تداخل بستگی به اختلاف طول مسیر بین پایه‌های مرجع و هدف در تداخل‌سنج دارد. اگر فواصل یکسان بود یا اختلاف، برابر ضریبی از طول موج بود، پرتوها نقطهٔ روشنی را ایجاد می‌کنند. در مقابل، اگر اختلاف فاصله مسیر مضربی از نصف طول موج باشد، پرتوها کاهیده می‌شوند و در آشکارساز نقطهٔ تیره تولید می‌شود [۲].

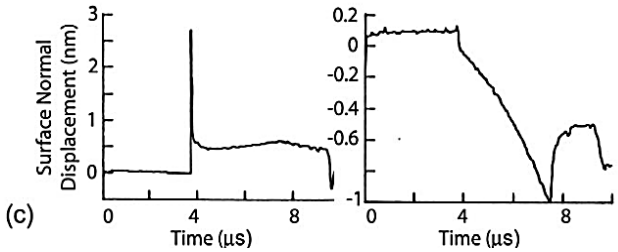
هر دو روش لبه چاقویی و تداخل‌سنج مایکلسون به‌شدت نسبت به ارتعاشات میز، زبری نمونه و حتی تغییرات دمایی هوا حساس‌اند [۲].



(ب)

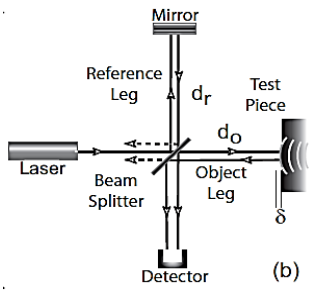


(الف)

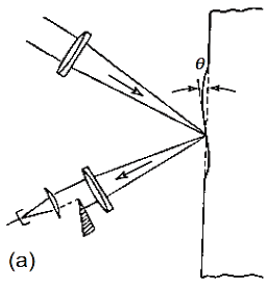


(ج)

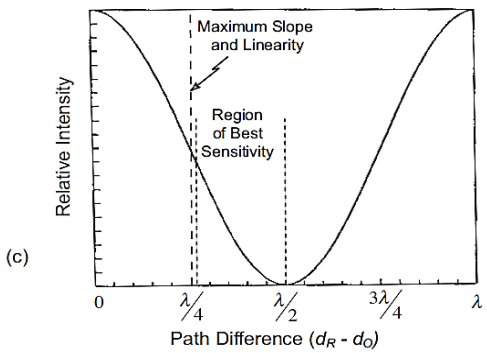
شکل۳. الف) بزرگی نیروهای عمود و موازی بر سطح نمونه، ب) الگوی جهت‌گیری امواج طولی و عرضی، ج) سیگنال پاسخ [۲]



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ٤. الف) طرح کلی بازرسی پرتو لیزر لبه چاقویی فراصوتی

ب) اساس کاربرد تداخل‌سنج مایکلسون برای بازرسی فراصوتی

ج) خروجی آشکارساز تداخل‌سنج که تابعی از جابه‌جایی می‌باشد [۲]

انواع لیزرهای تولید فراصوت

لیزرهای گازی

این دسته از لیزرها از رایج‌ترین و پرکاربردترین انواع لیزر هستند و جایگاه آنها در بسیاری از فرایندها دیده می‌شود. سیستم هلیوم - نئون، در میان اغلب روش‌ها، از لحاظ تداخل‌سنجی لیزر، کارآمدترین بوده و یک روش اصلی برای دریافت امواج فراصوتی از راه دور می‌باشد. سیستم‌های دیگر لیزرهای گازی پرتوان، همانند سیستم یونی آرگون، در وسعت پایین‌تری برای تداخل‌سنجی مورد استفاده قرار می‌گیرند. لیزرهای گازی همچنین برای تولید حالت پالسی در تولید امواج فراصوتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. سیستم‌های دی‌اکسید کربن و خانواده‌ای از لیزرهای رادیواکتیوی از این نوع‌اند. در جدول‌های ۱ و ۲ انواع سیستم‌های تجاری لیزر گازی به‌همراه بخشی از خصوصیات انواع موجود می‌باشد [۱].

لیزرهای پایه جامد

لیزرهای پایه جامد از منظر تجاری و پژوهشی حائز اهمیت‌اند، اما کاربرد آنها کمتر از گستردهٔ کاربردی لیزرهای گازی است. نخستین لیزر پایه جامد لیزر یاقوتی است، که همچنان برای آزادکردن پالس‌های پرتوان انرژی به‌صورت نور مرئی قرمز رنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. معروف‌ترین سیستم‌های لیزر پایه جامد بر پایهٔ جهش در نئودیمیوم می‌باشد. محیط لیزر از شیشهٔ دوپ نئودیمیوم[۱۶] یا دوپ نئودیمیوم YAG [۱۷] می‌باشد. طول موج بنیادین برای سیستم نئودیمیوم در مادون قرمز می‌باشد، اما نور مرئی با روش‌های دوبله فرکانسی می‌توان به‌دست آورد. در جدول‌های ۳ و ۴ انواع لیزرهای تجاری رایج برای تولید امواج فراصوتی آمده است [۱]. لیزرهای پایه جامد به‌طور گسترده در جاهایی که نیاز به پالس‌های کوتاه می‌باشد، کاربرد داشته و رایج‌ترین نوع لیزر برای تولید امواج فراصوتی می‌باشند. از سیستم Nd:YAG[۱۸] به‌طور فزاینده‌ای در فرایند امواج پیوسته[۱۹] نیز استفاده می‌شود. به‌تازگی با پیشرفت علم، لیزر دیودی، لیزر Nd:YAGcw را، که بسیار فشرده شده است، پمپ می‌کند و نیاز به وجود ولتاژهای بالا برای روشن‌کردن محفظهٔ تخلیهٔ الکتریکی را از میان برداشته است. بنابراین این لیزرها به‌طور روزافزون به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای تداخل‌سنج‌ها در امواج فراصوتی پیشنهاد می‌شوند [۱].

لیزرهای نیمه‌هادی

سیستم لیزر نیمه‌هادی سومین گروه اصلی از لیزرهاست، که این نوع در فراصوت لیزری استفاده می‌شود، مانند GaAlAs [۲۰]. این نوع طول‌های همدوسی کوتاه‌تر، پرتوهای کاملاً موازی کمتر و توان پایین‌تری نسبت به دو نوع دیگر دارد [۱].

تراگذارهای فراصوت لیزری

در بخش گذشته، لیزرهای مناسب برای تولید امواج فراصوتی معرفی شد. استفاده از تراگذارهای لیزری فراصوتی، خصوصاً برای قطعات فلزی بسیار مؤثر و کارآمد است؛ زیرا پرتوها ذاتاً از نوع الکترومغناطیس می‌باشند و از این‌رو بر سطوح فلزات بازتابیده می‌شوند و نمی‌تواند بیش‌تر از حد استاندارد نفوذ، نفوذ کند. کمیت δ، به‌عنوان عمق نفوذی معرفی می‌شود که در این عمق، دامنهٔ موج به نسبت $1/e$ مقدار سطح کاهش یافته و برابر با افت ۸/۷ دسی‌بل شود. پارامتر δ را می‌توان به‌صورت زیر نشان داد:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\omega \sigma \mu_r \mu_0}}$$

به‌طوری‌که در این رابطه، ω فرکانس زاویه‌ای پرتو لیزر، σ ضریب رسانایی الکتریکی، μ_r تراوایی مغناطیسی فلز و μ_0 ضریب تراوایی خلأ بوده و داریم:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ m^{-1}$$

در فرکانس‌های بسیار بالا تابش لیزری، 10^{14} تا 10^{15} هرتز، عمق نفوذ بی‌نهایت کوچک می‌باشد [۳]. با توجه به اینکه پرتوهای لیزر بسیار باریک‌اند، قطر منابع صوتی می‌توانند

خیلی کوچک باشند، مثلاً کسری از ۱، که این از لحاظ تشکیل منابع صوتی نقطه‌ای و گستردگی وسیع پرتو فراصوتی حائز اهمیت است. دامنه و جهت پرتوهای انتشاریافته به شدت پرتو لیزر بستگی دارد. در شدت‌های پایین، ارتعاشات امواج فشاری در راستای مورب سطح، روی سطح قطعه می‌باشد؛ زیرا مقاومت کافی برای نگه‌داشتن نیروهای عمودی وجود ندارد. اصولاً، محل‌های پوشیده‌شده از یک لایهٔ نازک روغن، آلاینده‌های دیگر روی سطح، مقدار مقاومت کافی را برای انتشار روبه جلوی امواج فشاری وگسترده‌تر شدن به‌صورت صفحهٔ کامل امواج عرضی را تأمین می‌کند [۳]. توسط پرتویی که دارای شدت کافی است، مقدار انرژی مورد نیاز برای انتشار روبه جلوی امواج فشاری تأمین می‌شود. باید توجه کرد که در این حالت ممکن است با بالارفتن بسیار زیاد دما، پدیدهٔ کاهندگی اتفاق افتاده و نمونه قدری تخریب شود. البته این مشکل برای ارزیابی بتن، و یا به‌عبارتی سازه‌ای که تحمل عیوب سطحی مذکور را دارد، قابل اغماض می‌باشد [۳].

با توجه به تنوع خصوصیات پالس‌های فراصوتی تولیدشده توسط لیزر، به‌طور خلاصه به برخی از ویژگی‌های آنها می‌پردازیم.

به‌طور کلی پالس‌های تولیدشده، با توجه به چگالی توان، به دو دستهٔ عمده تقسیم می‌شوند: پالس دما ارتجاعی و پالس کاهنده. که هر کدام دارای شکل موج زمانی و الگوی توزیع زاویه‌ای گوناگونی می‌باشند. امواج طولی، عرضی و سطحی در هر دو نوع می‌تواند تولید شود. فرکانس امواج دماارتجاعی می‌تواند در محدودهٔ بسیار وسیعی در حد گیگاهرتز متغییر باشد. در سطوح درخشان و اصلاح‌شده خصوصیت پالس صوتی ممکن است شدیداً دچار تغییر شده و خصوصاً سبب تولید موج طولی با دامنهٔ موج بلند شود. دامنه و شکل موج صوتی در روش دماارتجاعی، قابل تکثیر و تولید مجدد است در صورتی‌که این حالت در روش‌های کاهنده و در سطوح اصلاح‌شده، کم‌تر پیش می‌آید. دامنهٔ صوتی توسط روش‌های سادهٔ نوری، مانند صافی‌ها و عدسی‌ها به مقدار زیادی می‌تواند تغییر کند. امواج سطحی می‌توانند با تغییر در عدسی‌ها و محل قرارگیری روزنهٔ پرتو لیزر، در جهت‌گیری‌های متنوعی تولید شوند. در روش دماارتجاع، دامنهٔ صوتی متناسب با مقدار جذب انرژی می‌باشد، اما در روش کاهنده تابعی از چگالی توان می‌باشد. با فرض اینکه نقاط تولیدشده با جذب تابش‌ها، تنها در زیر سطح قطیبده می‌شوند، می‌توان پاسخ مناسبی را برای به‌دست آوردن مقدار پالس‌های دماارتجاعی به‌دست آورد. آثار انبساط‌های زیرسطحی محدود، که در منطقهٔ حرارت‌دیده ایجاد شده‌اند، در شکل پالس فراصوتی، و نیز در ناحیهٔ دور بسیار کم می‌باشد [۷].

در کاربرد این روش، در جاهایی که پراش نور و نور تولید شدهٔ امواج حرارتی با یکدیگر درگیر شوند، لیزرها، با منبع نور رایج به‌دلیل درخشانی و سازگاری پرتوهای آن بسیار کارآمد می‌باشند [۷].

تراگذارهای لیزری قادر به تولید سیگنال‌های فراصوتی در محدودهٔ گیگاهرتز بوده و همچنین یک سیگنال سادهٔ لیزر، توانایی تولید تمامی انواع امواج فراصوتی را دارند. امواج فراصوتی حاصل از لیزر را می‌توان به‌عنوان یک چشمهٔ موج نقطه‌ای استفاده کرد. پالس‌های فراصوتی می‌توانند طول زمانی بسیار کمی داشته باشند، که این خود سبب افزایش دقت وضوح اندازه‌گیری‌ها و گسترده‌شدن پهنای باند فرکانسی می‌شود [۷].

می‌توان توسط یک تراگذار، که در محل مناسبی روی سطح قطعهٔ نمونه جاگذاری شده است، امواج فراصوتی تولیدشده توسط لیزر را دریافت کرد. باید به این نکته توجه کرد در صورتی‌که امکان تماس تراگذار وجود دارد، استفاده از تراگذارهای پیزوالکتریکی بهتر است. برای بازرسی از راه دور، استفاده از تجهیزات گیرندهٔ نوری ضروری است. به‌منظور دریافت، یک لیزر توان‌پایین موج‌پیوسته، سطح قطعه را برای شناسایی ارتعاشات فراصوتی ناشی از منبع، کاوش می‌کند [۳].

تداخل‌سنجی امواج فراصوتی تولیدشده توسط لیزر

تداخل‌سنجی نوری یک روش با حساسیت بالا، برای اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی فراصوتی سطح، براساس نور بازتابیده‌شده و یا پراش‌یافته از سطح قطعه است. برای استفاده از این روش، وجود منبع نور تک‌فام و در نتیجه استفاده از لیزرها بسیار ضروری است [۱]. تداخل‌سنج‌ها را برای بازرسی جابه‌جایی‌های فراصوتی سطوح قطعه، می‌توان به دو نوع تقسیم کرد. در نوع اول، نور پراش‌یافته یا بازتابیده شده از یک سطح برای تداخل، با یک پرتو مرجع به‌عنوان یک مقیاس فاز نوری، استفاده می‌شود. در نتیجه جابه‌جایی آن سطح را می‌دهد. نوع دوم تداخل‌سنج، به‌عنوان یک طیف‌سنج نوری با وضوح بالا طراحی شده است، که تغییرات نور را در فرکانس نور پراش‌یافته و یا بازتابیده، شناسایی می‌کند. بنابراین خروجی آن به‌سرعت سطح بستگی دارد. نوع اول به‌طور وسیع استفاده می‌شود. این نوع در فرکانس‌های پایین‌تر، با سطوح تابش، کاربرد فراوانی دارد. نوع دوم دارای حساسیت بالایی است و برای سطوح زبر، در فرکانس‌های بالاتر، کاربرد دارد [۱].

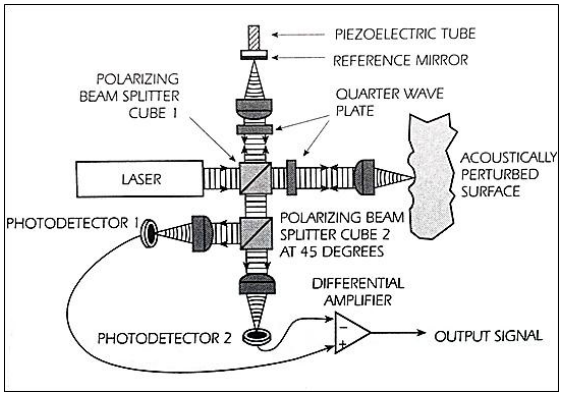
برای بازرسی اموج فراصوتی روی یک سطح، روش‌های تداخل‌سنجی نوری حساسیت پایین‌تری نسبت به تجهیزات پیزوالکتریکی دارند. با این‌حال، به چند مزیت استفاده از این روش اشاره می‌شود [۱]:

۱. غیرتماسی است و به میدان فراصوتی آسیب نمی‌زند. نقطهٔ مورد اندازه‌گیری سریعاً جابه‌جا می‌شود و از نظر حرارتی مشکلی پیش نمی‌آید.
۲. وضوح فاصله‌ای بالا بدون کاهش حساسیت. اندازه‌ها در صورت نیاز، روی چند میکرومتر قرار داده می‌شود.
۳. اندازه‌ها به‌طور مستقیم، وابسته به طول موج نور می‌باشند و نیازی به کالیبراسیون دیگری نیست.
۴. می‌تواند یک پاسخ فرکانسی صاف با پهنای وسیع داشته باشد، که در تراگذارهای پیزوالکتریک و در فرکانس‌های بالا، امر مشکلی می‌باشد.

اصول تداخل‌سنجی

تداخل از برهم‌نهی دو رشته پرتو، که از یک منبع گسیل شده‌اند و مسیرهای گوناگونی را طی کرده‌اند، حاصل می‌شود. الگوی تداخل رنگی نور را در یک فیلم نازک روغن روی آب می‌توان دید. در نور تک‌فام الگوهای تداخل به‌صورت نوارهای تاریک و روشن، به نام حاشیهٔ فیزو[۲۱]، شکل می‌گیرد. تداخل‌ها براساس سازنده یا ویرانگر بودنشان، توزیع حاصل از نور را، به‌صورت حاشیه‌های روشن و یا تاریک نشان می‌دهند. تداخل‌سنج‌ها براساس پدیدهٔ تداخل، اجازهٔ اندازه‌گیری مقادیر مختلفی را می‌دهند؛ از جمله: طول، تغییرات در طول، شکل آینه، ضریب انکسار، طول موج، طیف‌ها، شکل خط طیف و جز این‌ها. در اینجا بحث پیرامون اندازه‌گیری امواج فراصوتی، به‌ویژه انواع تداخل‌سنج‌ها که به‌صورت غیرتماسی، اندازه‌گیری رفتار امواج فراصوتی را در ارزیابی غیرمخرب قطعات امکان‌پذیر می‌کند، می‌باشد [۹].

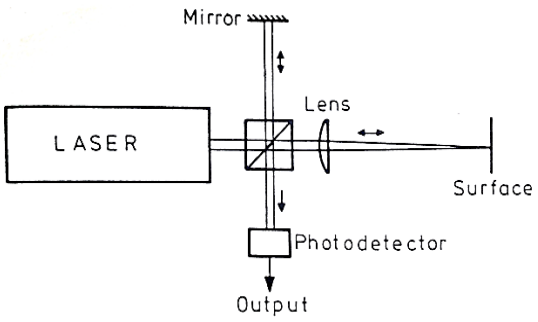
نخستین تداخل‌سنج توسط مایکلسون[۲۲]، حدوداً در سال ۱۸۰۰ م ابداع شد. شکل ۵ مدل اصلاحی تداخل‌سنج مورد استفاده در بازرسی امواج فراصوتی را نشان می‌دهد.



شکل ۵. تداخل‌سنج مایکلسون [۹]

نور حاصل از منبع لیزر، توسط یک جداکنندهٔ پرتو، تقسیم می‌شود. یک بخش (پرتو مرجع) به‌سوی آینهٔ مرجع بازتابیده می‌شود و بخش دیگر (پرتو حسگر) به‌سوی سطح نمونه‌ای که امواج فراصوتی روی آن انتشار یافته است

فرستاده می‌شود. این پرتو توسط یک عدسی روی نقطهٔ مشخصی روی سطح نمونه متمرکز می‌شود. پرتوهای بازتابی از نمونه و آینهٔ مرجع در یک جداکنندهٔ نور مجدداً ترکیب و به‌سمت آشکارساز فرستاده می‌شوند. دو پرتو برهم نهیده شده، با یکدیگر تداخل یافته، شدت‌های مختلفی را براساس جابه‌جایی امواج صوتی در آشکارساز نوری ایجاد می‌کنند. تغییرات جریان آشکارساز نوری به ولتاژهایی



شکل ٦. تداخل‌سنج مایکلسون با تمرکز پرتو روی سطح [۱]

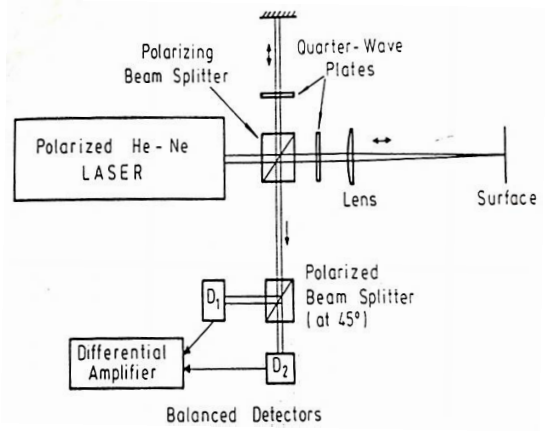
پرتو سیگنال را همواره روی سطحی که جابه‌جایی آن مورد نظر می‌باشد، متمرکز می‌کنند. همان‌طور که در شکل ۶ نیز نمایش داده شده است، این عمل برای سطوحی که از نظر نوری سطح تمام‌شدهٔ خوبی ندارند و در حالت‌هایی که سیگنال حساسیت کمی به کجی سطح دارد، دارای کاربرد است. اگر سطح پرداخت مات و ناصاف داشت، تمرکزدادن پرتو، امری ضروری برای به‌دست آوردن حساسیت قابل قبول می‌باشد [۱].

انواع تداخل‌سنجی‌ها

تداخل‌سنجی Homodyne

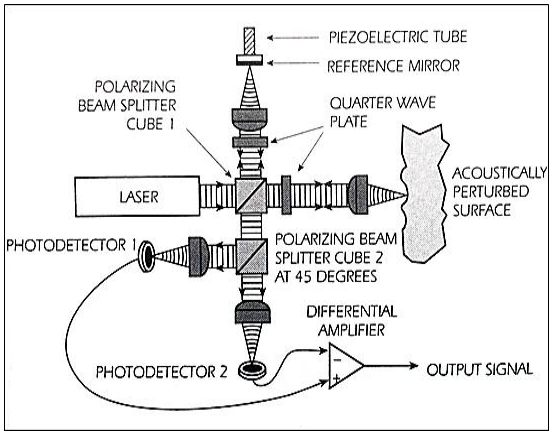
شکل ۸ نمایی کلی این نوع تداخل‌سنج را نمایش می‌دهد. پرتوی ورودی به تداخل‌سنج، با زاویهٔ صفحهٔ پلاریزه‌شدهٔ ۴۵ درجه، توسط جداکننده پرتو، به دو قسمت برابر تقسیم می‌شود. یک قسمت، با بردار الکتریکی خود، در صفحهٔ

تبدیل شده و روی یک نوسان‌نما و یا یک ضبط‌کنندهٔ موقتی، نمایش داده می‌شود. باید به این نکته توجه کرد که در جداکنندهٔ پرتو، هر بخش پرتو به لیزر برگشت می‌یابد [۹]. تداخل‌سنج‌های مختلفی به‌منظور بیشترین نور در دسترس، ساده‌سازی راستا و کاهش حساسیت به نویز وجود دارد. نمونه‌هایی از آن در شکل‌های ۶ و ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۷. نحوهٔ قرارگیری یک تداخل‌سنج نور مؤثر
با استفاده از جداکنندهٔ پرتو قطبیده‌شده و آشکارساز ترازشده [۱]

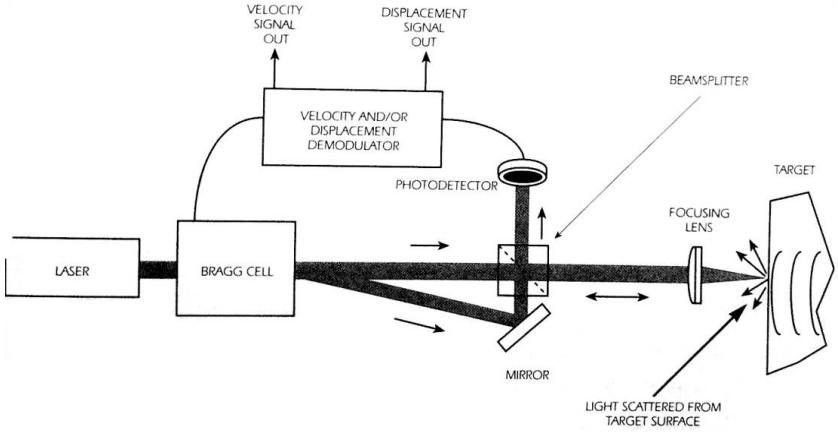
نشان داده شده، پلاریزه شده و به‌طور کامل به‌سمت نمونه فرستاده می‌شود و دیگری، با بردار الکتریکی عمود بر صفحهٔ نشان داده شده پلاریزه و به‌طور کامل به‌سمت آینه مرجع بازتابانده می‌شود. هر دو پرتو یک‌چهارم موج صفحه با زاویهٔ محوری ۴۵ درجه را با توجه به پرتوهای واردشده، تجربه می‌کنند، و به نور پلاریزه شده دایروی تبدیل می‌شوند. در بازتابش بالاتر، برای بار دوم یک‌چهارم موج صفحه را تجربه کرده و مجدداً سبب پلاریزه‌شدن صفحه‌ای می‌شود. با در نظر گرفتن اینکه در هر حالت، صفحات پلاریزاسیون برای نور ورودی، ۹۰ درجه دوران داده می‌شود. بنابراین پرتو نمونه و پرتو مرجع، در خروج به‌سمت آشکارساز، بدون نور برگشتی به منبع لیزر، به‌صورت صحیح جهت‌دهی می‌شود. دو مزیت این روش عبارت است از: لیزر توسط نور برگشتی مختل نمی‌شود وبازدهی، به‌دلیل عدم از دست دادن نور، دوبرابر می‌شود [۹].



شکل ۸ تداخل‌سنج مسیر پایدارشدهٔ مایکلسون [۹]

تداخل‌سنجی Heterodyne

نوعی تداخل‌سنج است که در این روش نیازی به پایدارسازی فعال، همانند آینه متحرک یا تلفیق‌کننده[۲۳] فاز نوری برای تنظیم تداخل‌سنج در نقطهٔ تربیعی نیست. اساس پیکربندی نوری و ریاضیات حاکم در این روش مشابه روش قبلی می‌باشد، جز اینکه این روش شامل ابزار نوری می‌باشد که یک جابه‌جایی کوچک متناسبی (ده‌ها یا صدها مگاهرتز در مقایسه با صدها تراهرتز فرکانس نوری)، را در فرکانس یک یا هر دو پرتو تداخل‌سنج ایجاد می‌کند. جابه‌جایی فرکانس نوری دلخواه را می توان توسط سلول براگ[۲۴] به‌دست آورد [۹]. یک نمونه از این نوع تداخل‌سنج در شکل ۹ نمایش داده شده است. همانند تداخل‌سنج Homodyne، پرتو لیزر به دو قسمت تقسیم می‌شود: پرتو مرجع و پرتو حسگر. در این طراحی، سلول براگ برای تقسیم پرتو و نیز تولید جابه‌جایی فرکانسی مورد نیاز (در اینجا، در پرتو مرجع)، استفاده می‌شود. پرتو منحرف‌نشده (جابه‌جانشده در فرکانس)، پرتو حسگر می‌باشد که به‌سوی سطح نمونه حرکت می‌کند و بازمی‌گردد. فراتر از ترکیب‌های دوباره و زیاد پرتو مرجع درجداکننده پرتو، مرجع و پرتو حسگر در آشکارساز نوری دوباره ترکیب شده و تولید جریان الکتریکی در اثر پدیدهٔ فتوالکتریکی با فرکانس ضربه‌ای برآشفتهٔ موج صوتی سلول براگ می‌کند. چون فرکانس‌های پرتو مرجع و حسگر متفاوت‌اند، حاشیه‌های تداخل‌سنجی به‌سرعت در سطح آشکارساز نوری پیدا و ناپیدا می‌شوند، هرچند با چشم قابل دیدن نیست، اما می‌توان توسط آشکارساز نوری نمایان ساخت. از این‌رو، نیاز به استفاده از پایدارساز مسیر عامل از بین می‌رود [۹].

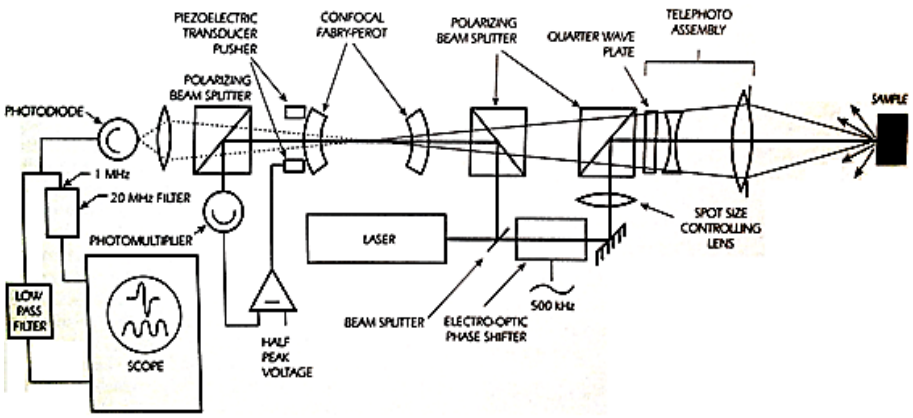


شکل ۹. نمونه‌ای از تداخل‌سنج Heterodyne [۹]

تداخل‌سنجی تأخیر زمانی سرعت

همان‌طور که در دو روش گذشته اشاره شد، برای تداخل‌سنجی به نور پراش‌یافته از سطح نمونه برای ترکیب پرتوها و در نتیجه ایجاد تداخل نیاز داریم. جبههٔ موج پرتو مرجع عموماً صفحه‌ای می‌باشد، در حالی‌که، جبههٔ موج، زمانی‌که نور از سطوح خشن پراش می‌یابد، فاز متغییر

داشته و با پرتو مرجع ترکیب مجدد پیدا کرده و به‌صورت نقطه‌نقطه نمایش می‌یابد و از حساسیت تداخل‌سنج می‌کاهد. تداخل‌سنج تأخیر زمانی، این مشکل را حل کرده است [۹]. اگر از جبههٔ موج پراش‌یافته عکس بگیریم و عکس‌هایی که در بازه‌های بسیار کوچک گرفته شده‌اند را با یک جبههٔ موج پراش یافته از نقطهٔ مشابه مقایسه کنیم، این دو پرتو می‌توانند با یکدیگر ترکیب شده و تداخل ایجاد کنند. در نتیجه می‌توان از جابه‌جایی امواج فراصوتی تحریک‌شده در سطح نمونه اطلاعات به‌دست آورد. با جای‌گذاری یک چرخهٔ تأخیر زمانی، به‌جای عکس‌گرفتن برای مقایسه‌کردن، می‌توان بعد از یکسری دوره‌های زمانی، سبب ترکیب پرتوها شد. نیازی به پرتو مرجع دیگری نیست (همان‌طور که در شکل ۱۰ نمایش داده شده است). نور پراش‌یافتهٔ واگراشده، توسط تجهیزات نوری جمع‌آوری و موازی‌سازی شده و به جداکنندهٔ پرتو، گسیل می‌شود. پرتو درون جداکنندهٔ پرتو، به دو قسمت، جبههٔ موج تأخیر زمانی (مرجع)، که در مسیر طولانی حرکت می‌کند، و موج حسگر، که مسیر بسیار کوتاهی را می‌پیماید، تقسیم می‌شود. به‌طور مؤثری، جبههٔ موجی که مسیر طولانی را می‌پیماید، تأخیر زمانی داشته و قابلیت ایجاد تداخل با موجی که مسیر کوتاهی می‌پیماید را دارد [۹].



شکل ۱۰. تداخل‌سنج هم‌کانون Fabry-Perot [۹]

تداخل‌سنجی پرتو چندگانه Fabry-Perot

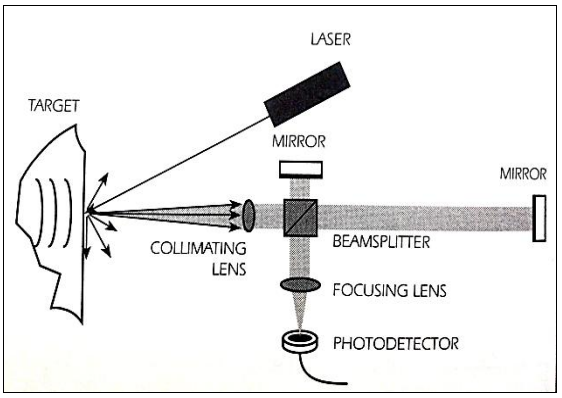
حفره پرتو چندگانهٔ Fabry-Perot همانند یک فیلتر تیز عمل می‌کند. این نوع شامل دو سطح نوری روکش‌دار جهت بازتاب ۹۹ درصدی نور برخورد کرده و جداکردن آن در فاصلهٔ d می‌شود. در این نوع گاه از آینه‌های تخت نیز استفاده می‌شود. به‌تازگی در جدیدترین نوع از دو آینهٔ کروی که توسط شعاع انحنا و نقطهٔ کانونی که در وسط دو آینه همدیگر را قطع می‌کنند، از یکدیگر جدا شده‌اند، استفاده می‌شود. پرتوی واردشده به این حفره چندین بار به‌سمت جلو و عقب بازتابیده می‌شود. پرتوهای ضعیف زیاد بیرون آمده، باید به‌طور مفید و سازنده تداخل یافته و ارسال یابند. شکل ۱۱ نمونه‌ای از این نوع تداخل‌سنج را نشان می‌دهد [۹].

کاربردهای فراصوت لیزری

تشخیص عیوب

استفاده از روش فراصوت لیزری برای تشخیص عیوب در فلزات در سال ۱۹۷۰ م منتشر شد. در سال ۱۹۷۳ م، کالدر[۲۵] و ویلکاکس[۲۶] با استفاده از لیزر یاقوتی ۱/۲ ژول Q-switched، سوراخ‌های $\frac{1}{16}$ اینچ ایجادشده در یک صفحهٔ آلومینیومی به‌ضخامت ۱ اینچ را بازرسی کردند. آنها با استفاده از یک تراگذار پیزوالکتریکی به‌عنوان گیرنده،

اکوهای امواج فراصوتی را شناسایی کردند. در همان سال، جیلیو[۲۷] موفق به ارزیابی عیوب، با استفاده از گیرنده‌های تداخل‌سنجی، برای روش فراصوت لیزری، شد. وی برای نخستین‌بار از یک منبع لیزر توان پایین (۵ کیلووات) با طول پالس ۳۰۰ نانو ثانیه استفاده کرد [۱].

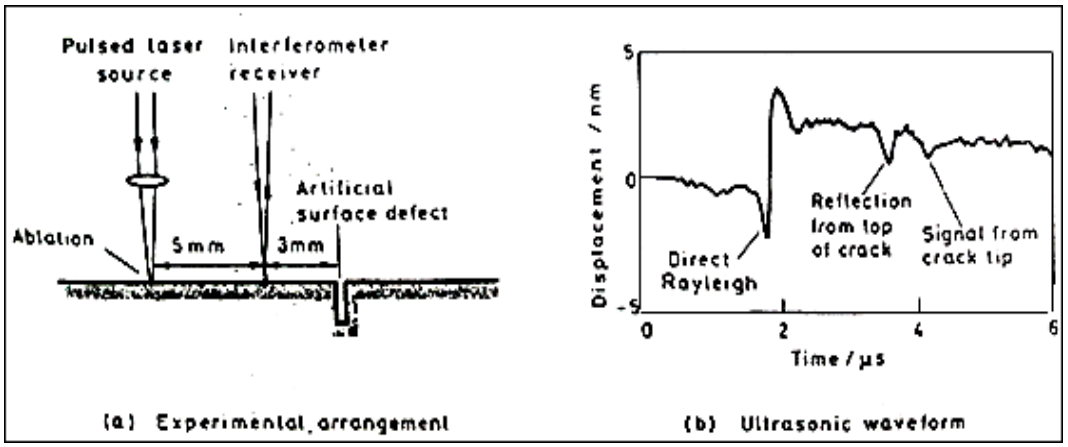


شکل ۱۱. تداخل‌سنج تأخیر زمانی سرعت [۹]

با استفاده از این روش تقریباً می‌توان تمامی انواع عیوب سطحی، زیرسطحی و حجمی را شناسایی کرد. اگرچه غالباً برای تشخیص عیوب در ارزیابی فراصوتی، از تراگذارهای پیزوالکتریک استفاده می‌شود، اما به‌دلیل مزایای ویژه، بازرسی از راه دور و غیرتماسی بودن، تراگذارهای فراصوت لیزری تولیدکننده و گیرندهٔ امواج فراصوتی، استفاده از این روش را منحصر به‌فرد کرده است. از دیگر مزایای این روش، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱]:

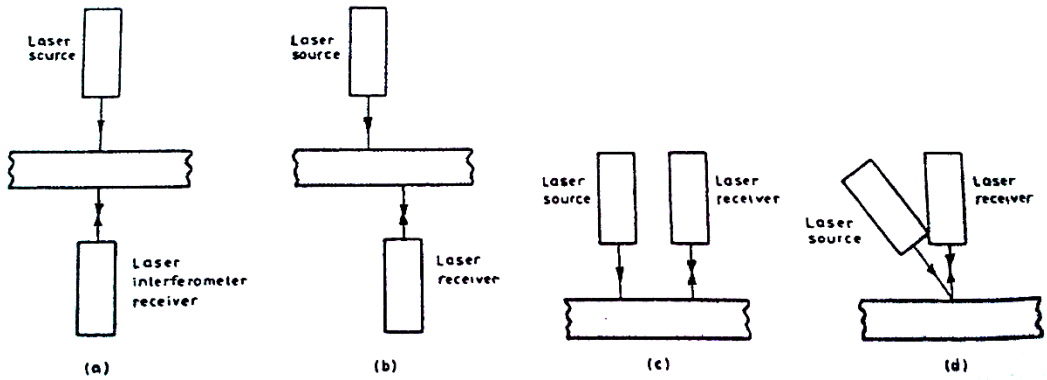
۱. بازرسی مواد در دماهای بالا (دماهای بیش از ۶۰۰ تا ۷۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد)
۲. بازرسی مواد در محیطهای خطرناک (وجود مواد سمی و رادیواکتیویته)
۳. بازرسی موادی که سطوح حساس به تماس و وجود آلاینده دارند
۴. بازرسی قطعات بسیار کوچک و نازک و نیز قطعات با مقاومت بالا، همانند سرامیک‌ها (اگر امکان بازرسی در زیر آب وجود داشته باشد، می‌توان با متمرکز کردن تراگذارهای غوطه‌وری، بازرسی خوبی انجام داد).
۵. بازرسی قطعات با اشکال پیچیده (با توجه به اینکه تراگذارهای معمول را به‌دلیل بزرگی نمی‌توان برای بازرسی این نوع قطعات به‌کار برد)
۶. انجام بازرسی‌های سریع‌تر با روش‌های گوناگون نوری
۷. به‌دست آوردن اطلاعات کمی، وسیع و با وضوح بیشتر از امواج فراصوتی (مثلاً در طی کالیبراسیون)

این مزایا برای هر دو روش لیزری و EMAT می‌باشد. شاید تراگذارهای EMAT به‌دلیل سادگی و ارزان‌تر بودن، نسبت به روش فراصوت لیزری بهتر باشد، اما در مواقعی که محل قرارگیری تراگذار بسیار کوچک بوده و بازرسی از راه دور مد نظر باشد، روش فراصوت لیزری کارآیی بیشتری دارد. چهار حالت قرارگیری تراگذارهای لیزری در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲. اندازه‌گیری عیوب سطحی توسط فراصوت لیزری [۱]

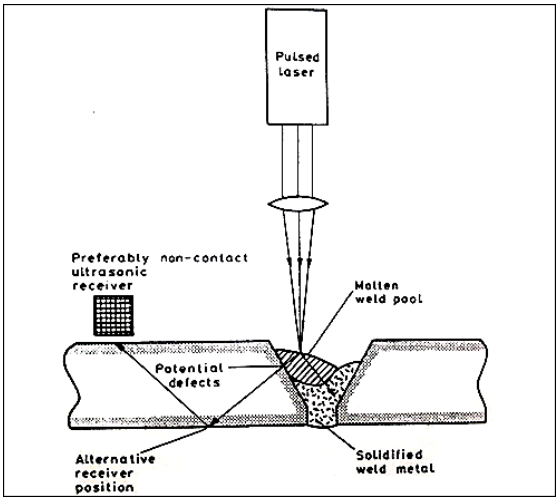
حالت الف برای اندازه‌گیری عیوب حجمی با استفاده از امواج فشاری در حالت کاهنده مناسب می‌باشد. حالت ب برای حالت‌های دما ارتجاعی، مناسب‌تر از حالت الف بوده و نیز برای اندازه‌گیری امواج برش کاربرد دارد. حالت ج مناسب برای اندازه‌گیری امواج سطحی و روش زمان پرواز[۲۸] مناسب می‌باشد [۱]. در بازرسی فراصوت لیزری، با ایجاد امواج ریلی دامنه بالا و کاوش آنها، می‌توان ترک‌های سطحی را شناسایی نمود. با توجه به اطلاعات منتشرشده، با روش غیرتماسی فراصوت لیزری می‌توان عیوب کمتر از ۱۰۰ میکرومتر را به‌راحتی بازرسی نمود. شکل الف-۱۳ نحوهٔ به‌کارگیری روش فراصوت لیزری را به‌منظور اندازه‌گیری ترک‌های سطحی نشان می‌دهد. اطلاعات به‌دست آمده در شکل ب-۱۳ نمایش داده شده است.



شکل ۱۳. الف) عبوری مستقیم، ب) عبوری غیرمستقیم، ج) اندازه‌گیری یک‌طرفه، د) پالس اکو یک‌طرفه [۱]

بازرسی جوش

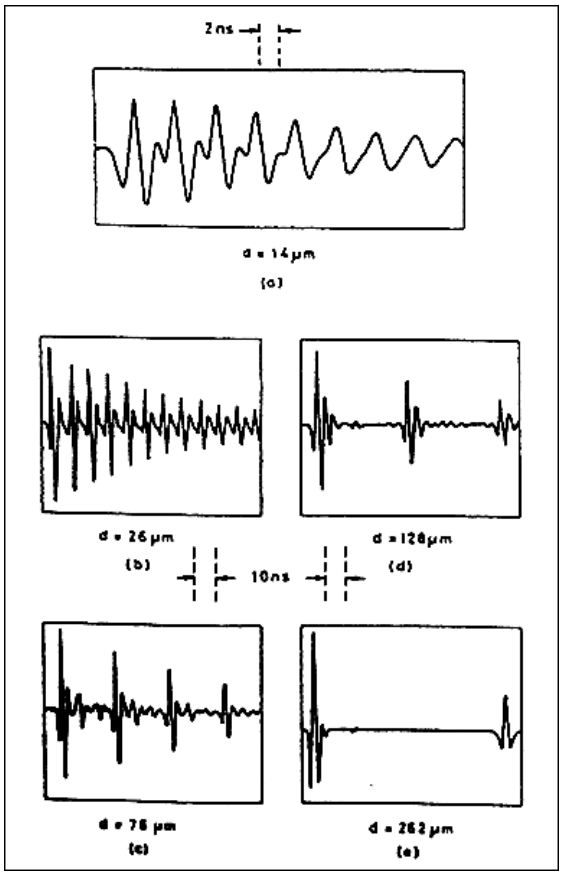
یکی از مهم‌ترین اتصالات در صنعت، اتصالات جوش می‌باشد. برای کسب اطمینان از اینکه جوش استحکام لازم را برای کارکرد مورد نظر دارد، نیاز به بازرسی آن داریم، تا از نبود هرگونه عیبی در جوش اطلاع یابیم. یکی از مشکلات مهم در بازرسی جوش این است که، بعد از شناسایی عیب در قطعهٔ جوشکاری‌شده، برای رفع عیب باید سنگ‌زنی و با پرکنندهٔ ثانویه، جوش بار دیگر انجام شود، که این علاوه بر ایجاد هزینهٔ زیاد، موجب ضعیف‌شدن اتصال جوش و یا افزایش عیوب در جوش شود. یک روش برای پیشگیری از بروز چنین مشکلی استفاده از روش بازرسی برخط[۲۹] جهت بازرسی در حین فرایند جوشکاری می‌باشد، تا در صورت بروز عیب سریعاً عیب را از بین برده و یا جوشکاری مجدد انجام گیرد. با روش بازرسی برخط قسمت عمده‌ای از عیوب مانند نفوذ ناقص جوش، پرشدگی ناقص و عیوب دیگر، را می‌توان شناسایی کرد، تنها عیوبی همچون، ترک‌های احتمالی بعد از جوشکاری را نمی‌توان شناسایی نمود. با کنترل اندازه و محل حوضچهٔ مذاب جوش می‌توان قسمت زیادی از عیوب جوشکاری را کنترل کرد. چون منطقهٔ مجاور حوضچهٔ مذاب بسیار داغ است، استفاده از تراگذارهای پیزوالکتریک و یا هر نوع ماده واسط غیرممکن است. در این شرایط استفاده از روش بازرسی غیر تماسی فراصوت لیزری، بیشتر خود را نشان می‌دهد. یک لیزر (مانند لیزر YAG) را می توان به‌سوی حوضچهٔ مذاب هدایت کرد و امواج فراصوتی را در مرز حوضچهٔ مذاب و قسمت‌های فعال برای ایجادشدن عیب تولید نمود (شکل ۱۴). تراگذار گیرندهٔ امواج فراصوتی بازتابی می‌تواند به‌صورت روش‌های نوری و تداخل‌سنجی و غیرتماسی باشد، اما با توجه به اینکه کیفیت سطح قطعه برای تداخل‌سنجی مناسب نمی‌باشد، اغلب از تراگذارهای پیزوالکتریک و جدیداً از تراگذارهای غیرتماسی EMAT استفاده می‌شود [۱].



شکل ۱۴. نمای دستگاه بازرسی عیوب در حین عملیات جوشکاری [۱]

ضخامت‌سنجی

سالیانی است که از روش بازرسی فراصوت لیزری برای اندازه گیری ضخامت استفاده می‌شود؛ زیرا این روش قادر به تولید انواع امواج سطحی و ورقی است. یک روش برای اندازه‌گیری ضخامت استفاده از روش زمان پرواز موج پالسی فشاری یک تراگذار پالس اکو تماسی می‌باشد. با وجود محدودیت در دماهای نسبتاً کم، این روش‌های اندازه‌گیری ضخامت، برای ضخامت های بالای ۰/۵ میلی‌متر، به‌دلیل زمان مردهٔ تراگذار و مشکلات ایجادشده به‌جهت همپوشانی اکوها محدود شدند. لیزرهای فراصوتی بر این مشکلات غالب آمدند. در سال ۱۹۷۶ م، بـندارنکو[۳۰] برای نخستین‌بار امواج فراصوتی را در یک طرف یکسان روی سطح فولادی و لولهٔ فولادی تولید کرد. اطلاعات حاصل از صفحهٔ فولادی به‌صورت دنباله‌ای از اکوهایی بود که زمان هر رفت و برگشت را می توانستیم اندازه‌گیری کنیم، در نتیجه با دانستن سرعت، ضخامت قابل اندازه‌گیری بود [۱]. اخیراً، با استفاده از روش فراصوت لیزری و تراگذار فرکانس بالای پیزوالکتریکی اکسید روی، به‌عنوان گیرنده، ضخامت فیلم نازکی از فولاد ضدزنگ اندازه‌گیری شده است. با استفاده از لیزر نیتروژن، با طول مدت پالس ۰/۵ نانوثانیه، زمان‌های اکوهای رفت و برگشت، با صحت ۱ درصد، از فیلم‌های فولادی با ضخامت‌های گوناگون اندازه‌گیری شده است (شکل ۱۵). بنابراین، برای نازک‌ترین فیلم، ضخامت ۱۲/۶ میکرومتر، اندازه‌گیری شده است [۱].

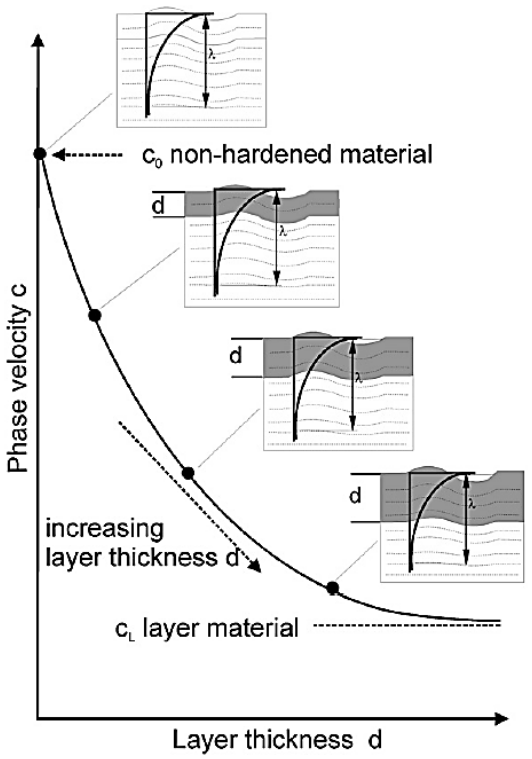


شکل ۱۵. تکرار امواج پالسی بازتابیده روی فولاد ضدزنگ ۳۰۲، با ضخامت d، که توسط فراصوت لیزری تولید شده است [۱]

اندازه‌گیری عمق لایهٔ سخت‌شده

عملیات سخت‌کردن سطحی به‌منظور بالابردن سختی لایهٔ خارجی قطعه و افزایش مقاومت آن در مقابل سایش و در نتیجه بالابردن طول عمر قطعه انجام می‌گیرد. در این عملیات، سطح قطعهٔ مورد نظر سخت می‌شود، در حالی‌که قسمت‌های داخلی آن دارای چقرمگی نسبتاً خوبی می‌باشد، به‌طوری‌که می‌تواند در مقابل تنش‌های پیچشی و ضربه‌ای یا به‌عبارتی بارهای دینامیکی مقاومت خوبی داشته باشد. اتخاذ روشی برای کنترل میزان توزیع عمق لایهٔ

سخت‌شده، از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد. اخیراً از روش بازرسی غیرمخرب فراصوت لیزری در اندازه‌گیری عمق لایهٔ سخت‌شده استفاده می‌شود. در این روش امواج سطحی با فرکانس ۱ الی ۱۰ مگاهرتز توسط لیزر تولید و به سطح قطعه فرستاده می‌شود. امواج سطحی با فرکانس متغییر می‌تواند در عمق لایه‌های مختلف ایجاد شود. با توجه به ساختار متفاوت لایهٔ سخت‌شده عموماً مارتنزیتی، با مغز قطعه، اختلاف سرعت در امواج فراصوتی سطحی رخ می‌دهد که براساس آن اندازه‌گیری عمق لایهٔ سخت‌شده امکان‌پذیر است (شکل ۱۶) [۱۰].



شکل ۱۶. تأثیر لایهٔ سخت‌شده بر سرعت موج فراصوتی [۱۰]

اندازه‌گیری ثوابت الاستیکی

از روش بازرسی فراصوت لیزری می‌توان ثوابت الاستیکی را برای هر مادهٔ دلخواه به‌دست آورد. اکثر روش‌های موجود از گذشته تاکنون براساس اندازه‌گیری زمان پرواز از سرعت امواج فراصوتی و در نتیجه استنباط ثوابت الاستیکی از روی معادلات مربوطه می‌باشد [۱].

اندازه‌گیری دانه‌بندی

قطعاتی که به روش‌های اکستروژن و یا نورد، تولید و ساخته می‌شوند، معمولاً میکروساختارهای ناهمسانگردی دارند. با توجه به کاربرد این قطعات، و با در نظر گرفتن اثر دانه‌بندی در رفتار مکانیکی مواد، نیاز به نمایش و همچنین کنترل دانه‌بندی قطعات داریم. اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوتی یکی از روش‌های شناسایی و کنترل دانه‌بندی می باشد [۱]. با تولید امواج فراصوتی با استفاده از یک منبع لیزر در قطعهٔ مورد نظر، و سپس اندازه‌گیری سرعت امواج فشاری و ریلی، توسط تراگذارهای پیزوالکتریکی و یا با استفاده از روش‌های تداخل سنجی نوری، می‌توان جهت دانه‌بندی را شناسایی کرد؛ زیرا سرعت امواج در راستاهای مختلف دانه‌بندی شده، متفاوت می‌باشد.

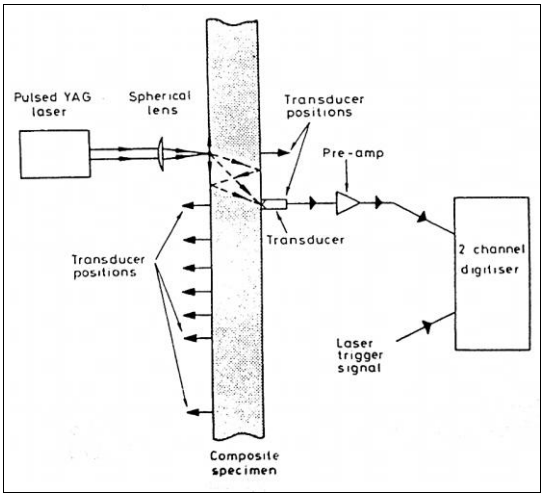
اندازه‌گیری دمای داخلی

در صنعت فولاد، یکی از موضوعات مهم اطلاع از دمای داخلی جسم داغ است. یکی از چند روش برای این امر، استفاده از روش فراصوت لیزری می‌باشد؛ زیرا سرعت‌های امواج فراصوتی وابسته به دما بوده و نیز مشخص می‌باشد. در این روش امواج فراصوتی توسط یک منبع لیزر، تولید و به قطعهٔ نمونه ارسال می‌شود. برای دریافت امواج فراصوتی بازتابیده شده از تراگذارهای EMAT (به‌طور رایج) و یا از روش‌های تداخل سنجی نوری استفاده می‌شود و سپس با اندازه‌گیری سرعت امواج می‌توان به دمای داخلی قطعه پی‌برد [۱].

شناسایی خصوصیات مواد مرکب

اگرچه اغلب از روش بازرسی فراصوت لیزری برای مواد فلزی استفاده می‌شود، اما به‌تازگی شاهد رشد کاربرد این روش برای مواد غیرفلزی، شامل مواد مهم مرکب و مهندسی نیز می‌باشیم. سازوکار تولید امواج فراصوتی درون مواد غیرفلزی متفاوت با مواد فلزی می‌باشد، بنابراین انتخاب نوع منبع مهم دشوار می‌باشد، به‌ویژه در مواد

مرکبی که از قسمت های رسانا و نارسانا تشکیل شده‌اند. بازرسی نوری در مواد مرکب، بسیار دشوارتر از مواد فلزی می‌باشد؛ زیرا اکثر مواد به‌کار برده شده در مواد مرکب بازتابش ضعیفی دارند. پیچیدگی دیگر در بازرسی مواد مرکب، ناهمسانگردبودن شدید مواد مرکب با در نظر گرفتن انتشار امواج فراصوتی در این مواد است. مطالعات اولیه توسط اسکربی[۳۱] و باتل[۳۲]، در سال ۱۹۸۸ م، از یک منبع لیزر پالسی و یک تراگذار پیزوالکتریکی تماس نقطه‌ای برای تحقیق در مورد نحوهٔ انتشار امواج الاستیک درون مواد مرکب فیبر شیشه‌ای[۳۳] و فیبر کربنی[۳۴] با زمینهٔ اپوکسی صورت گرفت، که اطلاعات مهمی از این مطالعات در مورد خصوصیات امواج فراصوتی برای مواد به‌دست آمد (شکل ۱۷).



شکل ۱۷. نمای دستگاه اندازه‌گیری خصوصیات مواد مرکب با استفاده از منبع لیزر پالسی [۱]

با انجام یک‌سری اندازه‌گیری‌ها، با کاوش مرتب منبع لیزر در جهت‌های موازی و عمود بر راستای فیبرها، سرعت امواج با صحت خوبی اندازه‌گیری می‌شود. سرعت‌های اندازه‌گیری‌شده در جهت‌های موازی و عمود به راستای فیبرها به‌ترتیب ۴۷۷۰ و ۲۹۸۰ متر بر ثانیه در یک جهت GRP و ۹۳۱۰ و ۲۴۵۰ متر بر ثانیه در یک جهت CFRP می‌باشند. صحت اندازه گیری حدوداً ۰/۵ درصد است. با رسم نمودارهای مربوط به اندازه‌گیری سرعت و میرایی امواج فراصوتی تولیدشده نسبت به زوایای گوناگونی که بین انتشار امواج و راستای فیبرها ایجاد می‌کنیم و تحلیل آنها، می‌توان به خصوصیات مواد مرکب پی‌برد [۱].

کاربرد پزشکی

استفاده از امواج فراصوتی در تشخیص‌های پزشکی بسیار چشم‌گیر بوده است. فراصوت لیزری، با توجه به ویژگی‌های منحصر به‌فرد خود، به‌صورت بسیار کمی در زمینهٔ پزشکی دخیل می‌باشد؛ زیرا تراگذارهای تماسی رایج، به‌طور کافی اهداف مورد نظر را برآورده می‌کنند، بنابراین نیازی به جایگزین ندارند. وجود مواد واسط اخلالی در امواج فراصوتی مورد استفاده در پزشکی ایجاد نمی‌کند، از طرفی مقاومت صوتی بسیاری از بافت‌های بدن با آب و مواد واسط سیال دیگر شباهت زیادی دارد. بنابراین به‌ندرت به مادهٔ واسط خارجی نیاز می‌شود، همچنین اندازه‌گیری‌های لازم به‌ندرت در دماهای بالاتر از دمای نرمال بدن صورت می‌گیرد. با توجه به موارد مذکور استفاده از تراگذارهای پیزوالکتریکی ارجحیت پیدا می‌کند [۱]. با این‌وجود، در برخی از کاربردهای خاص استفاده از تراگذارهای تماسی پیزوالکتریکی نامناسب است و استفاده از فراصوت لیزری ضروری است. در سال ۱۹۸۰ م،گوتفیلد[۳۵] طرحی را برای تشخیص بیماری‌ها به‌صورت محوری کامپیوتری[۳۶]، با اندازه‌گیری امواج فراصوتی ایجادشده توسط منبع لیزر پالسی، با مزیت سرعت بالای اسکن نوری، ارائه داد. یکی دیگر از کاربردهای پزشکی فراصوت لیزری، توانایی ساخت تراگذارهایی با سر بسیار کوچک (قطر کوچکتر از ۱۰۰ میکرومتر)، با استفاده از فیبرهای نوری، جهت آندوسکوپی و جراحی‌های در ابعاد میکرو می‌باشد [۱].

جمع‌بندی

با توجه به مطالب ذکرشده، روش بازرسی غیرمخرب فراصوت لیزری، با تلفیق ویژگی‌های نوری لیزر و امواج

فراصوتی، یکی از روش‌های بازرسی کارآمد و منحصر به‌فرد است. کاربردهای ذکرشده تنها نمونه‌ای از انواع گوناگون کاربرد روش فراصوت لیزری است. اصلی‌ترین مزایای استفاده از روش فراصوت لیزری در ارزیابی غیرمخرب عبارت‌اند از: غیرتماسی بودن آن که تراگذارها می‌توانند به‌صورت از راه دور برای بازرسی قطعهٔ نمونه جاگذاری شوند، امکان پایش سریع، محدودهٔ گسترده‌ای از فرکانس‌ها را می‌توان به‌کار برد، نیازی به جهت‌دهی دقیق تراگذارها نمی‌باشد، قطعات بدشکل را نیز می‌توان بازرسی کرد و به محیط زیست آسیب نمی‌زند [۳].

از معایب استفاده از این روش می‌توان به این موارد اشاره کرد: محدودیت نسبی در بالا بردن دامنهٔ موج وجود دارد، حالت غیرکاهندهٔ بیشتر مورد نظر می‌باشد، تجهیزات گران و بزرگ می‌باشند، نیازمند مهارت بالا برای استفاده و اقدامات پیشگیرانه ایمنی جهت جلوگیری از سوختگی و آسیب چشمی و بینایی [۳].

با توجه به مختصر معایب و مزایای مذکور، می‌توان به کارآیی این روش در شرایط و کاربردهای خاص، پی‌برد. به‌طور کلی جهت انتخاب یک روش بازرسی غیرمخرب، باید تمامی پارامترهای دخیل در اندازه‌گیری، شامل نوع فرایند اندازه‌گیری، روش ساخت و تولید قطعه، دقت مورد نیاز، هزینه‌های اندازه‌گیری، سهولت کاربرد، تجهیزات اندازه‌گیری، شرایط محیط و سایر موارد، به دقت مورد بررسی قرار گیرد.

جدول ۱. لیزرهای پالسی گازی تجاری با قابلیت استفاده در تولید امواج فراصوتی [۱]

گاز	طول موج (میکرومتر)	نرخ نوسان (هرتز)	خروجی (ژول)	زمان پالس (نانوثانیه)	توضیحات
دی‌اکسید کربن	۱۰/۶	$< ۱۰^{۴}$	< ۲۲۰۰	۶ تا ۱۱۰۰	تولید امواج IR و فراصوت
مس بخار	۰/۵۷۸ و ۰/۵۱	< ۲۰۰۰۰	< ۰/۰۳	۱۰ تا ۶۰	مناسب برای نرخ فرکانس بالا
آرگون فلوراید	۰/۱۹۳	< ۵۰۰	< ۰/۶	۵/۵ تا ۲۵	تولید امواج اکسیمر، فرابنفش و فراصوت
نیتروژن	۰/۴۲۸ و ۰/۳۳۷	< ۱۰۰	< ۰/۰۳۵	۵۰ پیکوثانیه تا ۱۰ نانوثانیه	تولید امواج فرابنفش و فراصوت
فلورین	۰/۱۵۷	< ۵۰۰	< ۰/۰۳	۱۰	تولید امواج اکسیمر، فرابنفش
کریپتون فلوراید	۰/۲۴۸	< ۵۰۰	< ۱/۵	۳۰ پیکوثانیه تا ۸۰ نانوثانیه	تولید امواج اکسیمر، فرابنفش و فراصوت
زنون کلراید	۰/۳۰۸	< ۵۰۰	< ۴۰۰	۳۰ پیکوثانیه تا ۸۰ میکروثانیه	تولید امواج اکسیمر، فرابنفش و فراصوت
زنون فلوراید	۰/۳۵۱	< ۵۰۰	< ۱۰	۸ پیکوثانیه تا ۱ میکروثانیه	تولید امواج اکسیمر، فرابنفش و فراصوت

جدول ۲. سیستم‌های تجاری لیزر گازی موج پیوسته پمپاژشده توسط تخلیهٔ الکتریکی، با قابلیت استفاده در تولید امواج فراصوتی [۱]

توضیحات	خروجی (وات)	طول موج (میکرومتر)	سیستم
توان مد-ساده پایین‌تر، مناسب تداخل‌سنجی و قدرتمندتر از هلیوم- نئون	< ۲۰	۰/۵۱۴ و ۰/۴۸۸	آرگون
توان بسیار بالا، ۱۰ میکرومتر بسیار زیاد برای تداخل‌سنجی	< ۱۰۰۰۰	۱۰/۶	کربن دی اکسید

اندازه طول موج زیاد جهت تداخل سنجی	< ۲۰	۰/۵ الی ۶/۴	کربن منوکسید
تاکنون گزارش تداخل سنجی نشده، نویز بالا	< ۷۵۰۰۰۰۰۰	۰/۴۴۲	هلیوم- کادمیوم
چند مده، مد ساده 3 mW > مناسب برای تداخل سنجی	< ۵۰۰۰۰۰۰۰	۰/۶۳۳	هلیوم- نئون
تاکنون گزارش تداخل سنجی نشده، بازده کمتر نسبت به آرگون	< ۶	۰/۶۴۷	کریپتون

جدول ۳. لیزرهای تجاری پایه جامد موج پیوسته مناسب فراصوت [۱]

توضیحات	خروجی (وات)	طول موج (میکرومتر)	سیستم
مد- ساده (توان پایین) مناسب برای تداخل‌سنجی در فروسرخ و مرئی	< ۱۰۰۰	۰/۳۵۵ و ۰/۵۳ و ۱/۰۶ و ۱/۳۲	Nd:YAG (پمپ کوارتز ید)
پیشرفت سریع، مناسب تداخل سنجی	< ۱۰۰۰۰۰۰	۱/۰۶ و ۰/۵۳	Nd:glass (پمپ لیزر دیود)

جدول ۴. لیزرهای تجاری پالسی پایه جامد با قابلیت استفاده در تولید امواج فراصوتی [۱]

توضیحات	نرخ نوسان (هرتز)	زمان پالس (نانوثانیه)	خروجی (ژول)	طول موج (میکرومتر)	محیط
مناسب برای تولید فراصوت	< ۵۰۰۰۰	۳۰ پیکوثانیه تا ۲۰ میلی‌ثانیه	< ۱۵۰	۰/۲۶۶ و ۰/۳۵۵ و ۰/۵۳۲ و ۱/۲۶ و ۱/۳۲	Nd:YAG
مشابه Nd:YAG، فشردگی کمتر	< ۱۲۰	۱۰۰ پیکوثانیه تا ۲ میلی‌ثانیه	< ۱۰۰۰۰	۰/۲۶۶ و ۰/۳۵۵ و ۱/۰۶ و ۰/۵۳۲	Nd:glass
مناسب برای تولید فراصوت	< ۱۲۰	۱۵ نانوثانیه تا ۳ میلی‌ثانیه	< ۴۰۰	۰/۶۹۴	Ruby

مآخذ

[1] C B Scruby and L E Drain, *Laser Ultrasonics Techniques and Applications*, Adam Hilger, 1990.

[2] Donald O. Thompson and Dale E. Chimenti, R*eview of progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 25A, AIP, 2006.

[3] Peter J. Shull, *Nondestructive Evaluation Theory Techniques and Applications*, Marcel Dekker.

[4] J. David N. Cheeke, *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*, CRC Press, 2002.

[5] William T. Silfvast, *Laser Fundamentals*, 2nd ed., Cambridge University Press, 2004.

[6] Paul E. Mix, Introduction to Nondestructive Testing, 2nd ed., John Wiley & Sons, 2005.

[7] Jack Blitz and Geoff Simpson, *Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing*, Chapman & Hall, 1996.

[8] R. S. Sharpe, *Research Techniques in Nondestructive Testing*, Vol. 7, Academic Press, 1984.

[9] Roderic K. Stanley, technical editor, Patrick O. Moore and Paul Mclntire, editors, *Nondestructive Testing Handbook*, 2nd ed., American Society for Nondestructive Testing, INC, 1995.

[10] D. Schneider, R. Hofmann, T. Schwarz, T. Grosser, E. Hensel, *Evaluating surface hardened steels by laser-acoustics*, Surface & Coating Technology, Elsevier, 2012.

پی‌نوشت

1. ultrasound
2. Reyleigh
3. scattering
4. acoustic impedance
5. Light Amplification by Simulated Emission of Radiation (Laser)
6. PTZ
7. air-coupled transducer
8. EMAT
9. quality
10. ablative
11. thermoelastic
12. low-absorbing
13. far field
14. through-transmission
15. knife-edge method
16. neodymium-doped
17. Yttrium-Aluminum-Garnet
18. neodymium-doped Yttrium-Aluminum-Garnet
19. continues wave
20. Gallium Aluminum Arsenide
21. Fizeau fringes
22. A. A. Michelson
23. modulator
24. bragg cell
25. Calder
26. Wilcox
27. Giglio
28. Time-of-Flight technique
29. online
30. Bondarenko
31. Scurby
32. Buttle
33. GRP
34. CFRP
35. Gutfeld
36. computerized axial tomographic