

شبیه‌سازی و مشاهده تجربی تولید پالس صوتی با تابش پالس لیزر روی فلز

حسین شاهمیرزایی^{۱*}، عبدالرضا اسرار^۲، رضا مردانی^۳، محمد هادی سخنور^۴

hshahmirzaee@mut.ac.ir

asrara@mut.ac.ir

mardani_r@mut.ac.ir

hsokhanvar@mut.ac.ir

^{۱*} نویسنده مسئول، مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۲ مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۳ مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۴ مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۱۷

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۲۰

چکیده

در این مقاله به بررسی تولید امواج صوتی حاصل از تابش یک پالس لیزری بر یک ورق فلزی پرداخته‌ایم. به این منظور پس از مرور فرایندهای شناخته شده و معرفی معادله حاکم بر لیزر آکوستیک، نمایه پالس یک لیزر NdYAG را به عنوان منبع اپتو آکوستیکی با تابش مستقیم پرتو لیزر به یک سلول فوتورزیست و اندازه‌گیری کرده و در معادله حاکم بر پدیده بر لیزر آکوستیک جایگذاری کردیم. در نهایت جواب حاصل از حل معادله‌ها به روش عددی و اندازه‌گیری مستقیم امواج صوتی ایجاد شده را مقایسه کردیم. نتایج نشانگر آن است که بین پهنای پالس صوت ایجاد شده و پهنای پالس لیزر رابطه مستقیم وجود دارد. همچنین بین ضخامت بلوک تبدیل و پهنای موج صوتی حاصل رابطه عکس وجود دارد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌های تجربی با استفاده از میکروفون لیزری با آشکارساز فوتودیود و طیف اندازه‌گیری شده با طیف‌نگار صوتی، همخوانی مناسبی را نمایش می‌دهند. همچنین قاعده کلی شباهت نمایه پالس صوتی ایجاد شده با پالس لیزر مولد صوت در این آزمایش مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: لیزر، آکوستیک، لیزر آکوستیک.

۱. مقدمه

یکی از راه‌های کم‌هزینه برای تولید پالس‌های آکوستیکی با مشخصات متنوع از جمله فرکانس، پهنای پالس، شدت و جهت‌گیری پالس استفاده از لیزر در تولید موج آکوستیکی است. روش‌های متفاوتی از جمله برهم‌کنش نور لیزر با فلز، برهم‌کنش نور لیزر با مایعات گوناگون و برهم‌کنش نور لیزر با بلورهای نیمه‌هادی پیشنهاد شده است [۱-۱۲]. بسته به نوع

کاربرد مورد انتظار می‌توان از انواع لیزر با مشخصات مختلف و از برهم‌کنش آن با محیط‌های مختلف بهره برد. در مراجع [۱-۱۲] پنج نوع فرایند برای برهم‌کنش لیزر با ماده و ایجاد صوت پیشنهاد شده که عبارت‌اند از:

- برهم‌کنش لیزر با جامدات در رژیم غیرمخرب [۱، ۲، ۶] (روش غیرمخرب)؛

اثرات غیرخطی مواد مورد استفاده است [۲-۱۲]. برای بررسی مسئله در رژیم خطی توابع انتقالی ایجاد شده‌اند که به دست آوردن طیف فرکانس صدای ایجاد شده با لیزر را ممکن می‌کند [۱، ۶]. این مسئله قابلیت استفاده از لیزر در مخابرات صوتی و کدگذاری موج در رژیم خطی را امکان‌پذیر می‌سازد. بررسی اثر موج صوتی دور از منطقه تحریک، با کمک روش گام‌به‌گام انجام شده است [۱، ۶]. آنالیز عددی، محدودیت‌های فیزیکی مدل‌های خطی و اثرات غیرخطی را مشخص می‌کند. آزمایش نشان داده است که نظریه‌های ارائه شده را می‌توان با ضریب اطمینان بالا برای طراحی سامانه‌ها، استفاده کرد. نتایج بررسی بیشتر طیف‌سنج‌های اپتوآکوستیک پهن باند که در [۴-۸] به چاپ رسیده‌اند، نمایانگر توانایی آشکارساز موج حامل و مدولاسیون است.

نکته جالب توجه و مهم این است که منابع اپتوآکوستیک^۲ را می‌توان در رژیم فراصوتی قرار داد. در این روش غیرخطی بودن رفتار محیط در برخورد با پرتو لیزر در شدت‌های بالا عامل اصلی محدودکننده شدت موج آکوستیکی تولید شده است [۱]. در بررسی نظری این فرایند روش‌های مجانبی ارائه شدند تا اثرات اتلاف، پراش و مشخصات پالس لیزر بر موج صوتی غیرخطی تولید شده را توصیف کنند. در اثر تابش لیزر، برخی مشخصات ترموفیزیکی ماده می‌تواند تغییر کند. در مرجع [۱]، تأثیر تغییر ضریب انبساط گرمایی بر تولید امواج صوتی مورد تحلیل قرار گرفته است. در مراجع [۱-۲] اثرات غیرخطی پالس‌های صوتی با افزایش شدت نور لیزر فرودی برای نیمه‌رساناها بررسی شده است. فرایند تولید امواج صوتی سطحی و حجمی با جذب میان‌نواری^۳ نور در نیمه‌رساناها به طور کامل در مرجع [۱] مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. مبانی نظری

بخشی از اثر اپتوآکوستیک پالسی، تولید صوت به روش جذب نور به صورت غیریکنواخت، چه به لحاظ گستردگی فضایی و چه از نظر گستردگی زمانی را شامل می‌شود. در بررسی فرایند تحریک با لیزر و تولید صوت، الزاماً به آنالیز موج‌های غیریکنواخت نیاز داریم. ساده‌ترین شکل قابل

- برهم‌کنش لیزر با جامدات در رژیم مخرب [۶، ۲۱] (روش مخرب)؛
 - برهم‌کنش لیزر با مایعات در توان‌های خیلی پایین، انتقال انرژی گرمایی و تولید صوت در اثر انبساط [۶] (روش ترموالاستیک)؛
 - برهم‌کنش لیزر با مایعات در توان‌های متوسط، تبخیر آب، ایجاد موج شوک و صوتی [۶] (روش تبخیر)؛
 - برهم‌کنش لیزر با مایعات در توان‌های بالا و ایجاد پلاسما، موج شوک و صوتی [۶] (روش پلاسما).
- مطالعات انجام شده نشان داده‌اند که برهم‌کنش لیزر با جامدات نمایه‌های صوتی قابل کنترل تری ایجاد می‌کند [۶، ۲۱].

در آغاز این مقاله مروری خواهیم داشت بر مبانی علمی برهم‌کنش لیزر با یک جامد و در ادامه به ارائه نتایج آزمایش‌های انجام شده و بررسی نتایج خواهیم پرداخت. طبق نتایج ارائه شده در [۶]، بازدهی تولید موج صوتی از پرتو لیزر در فرایند تولید پلاسما می‌تواند تا ۳۰ درصد افزایش یابد؛ اما اثرات شدید غیرخطی در برهم‌کنش لیزر با مایعات برای تولید موج صوتی، اجازه طراحی و کنترل نمایه موج صوتی ایجاد شده را نمی‌دهد. از طرفی در برهم‌کنش لیزر با مایعات در فرایند ترموالاستیک- که نمایه موج صوتی ایجاد شده قابل طراحی و کنترل است، بازدهی تبدیل انرژی پالس لیزر به صوت بسیار پایین و از مرتبه 10^{-12} تا حداکثر 10^{-8} است [۶]. در عمل برهم‌کنش مستقیم لیزر با آب برای ایجاد موج صوتی حامل، با قابلیت کدگذاری برای ارسال و دریافت اطلاعات با برد قابل قبول، تاکنون نتایج مناسبی نداشته است؛ اما بازدهی بالاتر تولید موج صوتی در برهم‌کنش پرتو لیزر با جامدات [۱-۲] در فرایندهای غیرمخرب و حتی مخرب، امکان استفاده از لیزر در مخابرات صوتی را در پی دارد.

با توجه به توان پایین لیزر در روش غیرمخرب برهم‌کنش با جامدات، کاربردهای این روش محدود به استفاده آزمایشگاهی، طیف‌نگاری آکوستیکی و پزشکی است [۱-۱۲]؛ روش مخرب برای آزمایش‌های موادشناسی در ابعاد بزرگ، ایجاد اثر انفجار و تولید موج صوت پرتوان و بررسی

آورد. با استفاده از تبدیل‌های t -فوریه و x -لاپلاس، می‌توان طیف فرکانس سرعت ارتعاشی $\tilde{v}(\omega)$ در موج ایستایی خارج از منطقه تحریک را به شکل زیر به دست آورد [۱]:

$$v_\omega = \frac{1}{2\rho_0 c_L^2} (i\omega) \left[\hat{G} \left(\omega, i \frac{\omega}{c_L} \right) \pm \hat{G} \left(\omega, -i \frac{\omega}{c_L} \right) \right] \quad (3)$$

در این جا باید برای سطح صلب (سطحی که بازتاب موج از آن با ۱۸۰ درجه اختلاف فاز انجام می‌شود) از علامت + و برای سطح آزاد (سطحی که بازتاب از آن بدون اختلاف فاز صورت می‌پذیرد) از علامت - استفاده کرد. در معادله (۳)، ω فرکانس طیف است و تابع $G(\omega, p)$ به شکل رابطه (۴) تعریف می‌شود [۱]:

$$G(\omega, p) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega t} dt \int_0^{+\infty} dx. e^{-px}. G(x, t) \quad (4)$$

تعیین طیف فوریه-لاپلاس منابع صوت $G(\omega, p)$ ، در بررسی تحول موج در فضای فرکانس روش مؤثر و مرسوم‌تری است. این مورد را می‌توان در موقعیتی به دست آورد که تحول فضا-زمان توابع $T(t, x)$ و $n(t, x)$ با تبدیل انتگرالی مشخص شوند. در غیر این صورت، با کمک معادله (۳) می‌توان نمایه زمانی موج صوتی را به دست آورد. در این صورت شکل کلی جواب به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$v(\theta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega\theta} v(\omega) d\omega \\ = \frac{1}{2\pi c_L^2} \int_0^{+\infty} dx' \left[G_t \left(\theta + \frac{x'}{c_L}, x' \right) \pm G_t \left(\theta - \frac{x'}{c_L}, x' \right) \right] \quad (5)$$

که در آن $\theta = t - x/c_L$ مختصات دستگاه چسبیده به موج را نشان می‌دهد. از دیدگاه فیزیکی، عبارت‌های دوم در معادله‌های (۳) و (۴)، موج بازتاب شده از مرز را در سیگنال موجود در محیط نمایش می‌دهند.

توزیع‌های فضا-زمان میدان‌های شدت لیزر $I(t, x)$ ، دما $T(t, x)$ و چگالی الکترون-حفره $n(t, x)$ با سیستم پیچیده معادله‌های غیرخطی توصیف می‌شوند. خطی شدن و جدا کردن معادله موج (۱)، ساده‌ترین راه برای محاسبه نمایه و تحول موج صوتی در این مدل‌هاست. در واقع؛ تعادل بین زمان و نمایه جذب انرژی پرتو لیزر، نوع فرایند جذب و

تصور، موج تک‌بعدی (اسکالر) است که معادله حاکم بر آن به صورت رابطه (۱) است که تحریک امواج صوتی طولی بر اثر پرتو نور لیزر جذب شده در نیمه فضای $x > 0$ را توصیف می‌کند [۱]:

$$\rho_0 (v_{tt} - c_L^2 v_{xx}) = G_{tx} \quad (1)$$

که v سرعت موج صوتی، ρ_0 چگالی در حال تعادل، x و t مختصات زمان و مکان و تابع $G(t, x)$ توزیع منابع صوتی را تعیین می‌کند. در فرایند جذب نور درون باند در نیمه‌رساناها، تحریک امواج تابعی از تغییر شکل فضایی و زمانی میدان‌های دمایی $T(t, x)$ و چگالی جفت الکترون-حفره ($e-h$) تحریک شده با پرتو لیزر، $n(t, x)$ است، رابطه

$$G = -K_\beta T + d.n \quad (2)$$

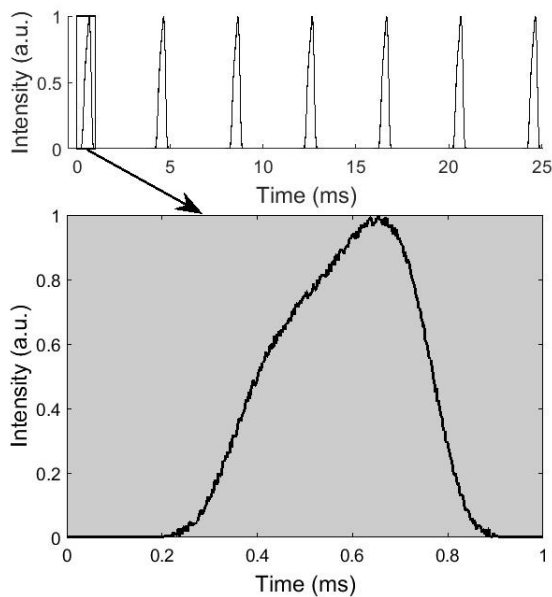
که K_β و β مدول و ضریب انبساط حجمی است و نمایانگر سهم منبع اپتوآکوستیک از تغییر شکل فضایی و زمانی میدان‌های دمایی $T(t, x)$ است. همچنین d ثابت تغییر چگالی جفت $e-h$ است که سهم منبع اپتوآکوستیک از چگالی جفت الکترون-حفره ($e-h$) تحریک شده با پرتو لیزر را نشان می‌دهد. در اصل معادله (۲)، دو فرایند تولید صوت را در بر دارد: اول، فریند ترموالاستیک، مرتبط با تغییر چگالی محیط با فرایند گرمایش و کرنش که ناشی از جذب انرژی در فرایند تحریک محیط با پالس لیزر است، که در نتیجه آن در یک بازه زمانی کوتاه و بسته به پهنای پالس لیزر، انرژی در محیط جذب می‌شود و این جذب انرژی تنش و کرنش محیط را به همراه دارد که خود عامل ایجاد موج فشار یا همان موج صوتی است. فرایند دوم؛ تولید زوج الکترون-حفره یا فرایند الکترونی است که شامل جذب فوتون‌های پالس لیزر و بعد از آن واهلش الکترون‌های برانگیخته است. نتیجه این تولید زوج تغییر چگالی الکترون در باند رسانش و در نتیجه ایجاد موج صوتی است. بیان این نکته ضروری است که تغییر حالت الکترون همیشه با تابش فوتون همراه نیست و در برخی موارد انرژی مستقیماً به تولید زوج منجر می‌شود.

جواب معادله (۱) را می‌توان بدون مشخص کردن ماهیت فیزیکی منابع و فقط با یک محاسبه تحلیلی کلی به دست

یک جریان متغیر است، به رایانه ارسال شد. سیگنال دریافتی به وسیله رایانه در نرم افزار متلب پردازش شده و حساسیت این سیگنال به پارامترهای لیزر توان بالا و بلوک تبدیل مورد بررسی قرار گرفت.

همان طور که بیان شد، عمل تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال را به جای استفاده از میکروکنترلرها و دیگر ادوات پردازنده، با کارت صدا انجام دادیم، طبق قضیه نایکوئیست^۴ به ازای یک مقدار مشخص فرکانس نمونه برداری، می توان سیگنال هایی را با حداکثر تا نیمی از آن فرکانس بازیابی کرد. به دلیل اینکه کارت صدای مورد استفاده در تست ۹۲ کیلوهرتز فرکانس نمونه برداری دارد، سیگنال های تا ۴۶ کیلوهرتز را می توان به وسیله آن دریافت کرد.

در مرحله اول از تست یک گیرنده نوری که همان فتورزیستور است را به صورت مستقیم در مقابل نور لیزر توان بالا قرار دادیم؛ با شدت های پایین پروفایل زمانی پالس لیزر را دریافت کردیم (شکل ۲).



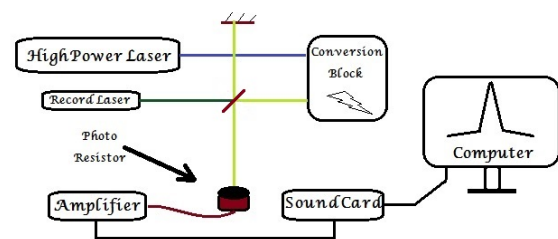
شکل ۲. پالس لیزر ثبت شده در برخورد مستقیم با فوتودیود

پهنای پالس در این آزمایش ۱۰۰ میکروثانیه و فرکانس تولید قطار پالس، ۲۵۰ هرتز تنظیم شد؛ اما همان طور که از شکل پیداست پهنای زمانی پالس های لیزر کمتر از یک میلی ثانیه و فرکانس تولید قطار پالس برابر با ۲۵۰ هرتز به دست آمده است. برای استفاده از این منبع اپتو آکوستیکی در معادله (۱)

شکل خنک شدن محیط یا به عبارتی شکل خروج انرژی از ناحیه جذب انرژی، بخشی از پارامترهای اصلی در تعیین نمایه موج صوتی است [۱]. این رفتار کلی محیط در برخورد با پرتو لیزر برای عموم جامدات صدق می کند و تنها ضرایب رابطه (۲) از تغییر محیط تأثیر می پذیرد. به عبارتی در یک جامد ممکن است اثر تولید صوت از زوج الکترون-حفره غالب شود و برعکس در جامد دیگر ممکن است اثر تغییرات دما عامل اصلی ایجاد صوت باشد [۶،۱].

۳. چیدمان تست و معرفی ملزومات

چیدمان استفاده شده برای تولید و آشکارسازی پالس صوتی با لیزر در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. نمای از چیدمان تست تولید و آشکارسازی پالس صوتی کوتاه با لیزر، لیزر پرتو توان در برخورد با یک ورق فلزی آن را به ارتعاش و می دارد. ارتعاش ایجاد شده با یک تداخل سنج و با کمک گیرنده نوری تقویت کننده ثبت می شود.

در آزمایش انجام شده از لیزر NdYAG با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر، توان خروجی تا سقف ۲۰۰ وات و پهنای پالس ۱۰۰ میکرو تا ۲۰ میلی ثانیه (معادل با انرژی پالس ۰/۰۲ ژول تا ۴ ژول) استفاده شد. پالس این لیزر در برخورد با بلوک تبدیل، یک موج صوتی تولید می کند. در این تست از ورق های استیل با ضخامت های ۱، ۲ و ۵ میلی متر به عنوان بلوک تبدیل استفاده شد. به منظور آشکارسازی این موج صوتی، از یک لیزر ثانویه (Record laser) با طول موج ۶۳۲ نانومتر استفاده کردیم. برخورد پرتو لیزر ثانویه با سطح مرتعش و تداخل آن با پرتو اصلی، باعث ایجاد الگوی تداخلی روی گیرنده می شود. گیرنده استفاده شده در این چیدمان یک فوتودیود (BPX 69- PIN, Peak value 900 nm, Res. Time 12 microsecond) است که می تواند تغییرات الگوی تداخلی را ثبت نماید. پس از تقویت، سیگنال خروجی فوتودیود که

$$G_x = \exp(-(0.8x - 2)^2) \quad (۷)$$

و در نتیجه G_{tx} برابر است با؛

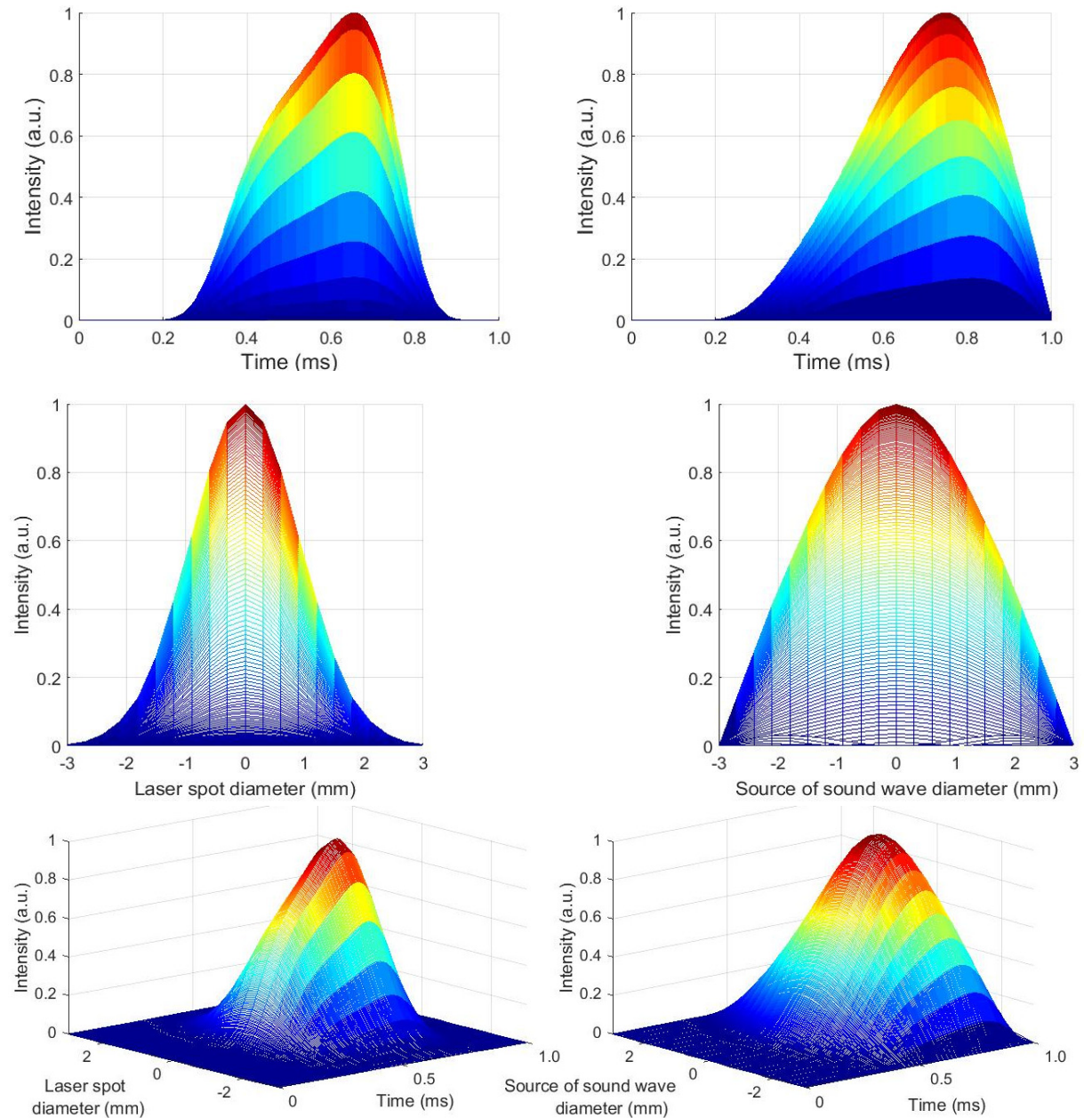
$$G_{tx} = G_t G_x = (10t + 1) \cdot \exp\left(-\left(\frac{10t - 1.9}{0.8}\right)^4\right) \cdot \exp(-(0.8x - 2)^2) \quad (۸)$$

با استفاده از G_{tx} تخمین زده شده با رابطه (۸) و جاگذاری این رابطه در معادله (۱)، نمایه زمانی و مکانی سرعت موج صوتی طبق شکل ۳ به دست می‌آید.

و به عنوان G_{tx} ناچاریم توزیع زمانی نمایه موج (G_t) در شکل ۲ را با یک رابطه ریاضی تخمین بزنیم. رابطه تخمین زده شده که با سعی و خطا به دست آمد، عبارت است از؛

$$G_t = (10t + 1) \cdot \exp\left(-\left(\frac{10t - 1.9}{0.8}\right)^4\right) \quad (۶)$$

با در نظر گرفتن اندازه پهنای لکه لیزر و با فرض صحیح گاوسی بودن توزیع شدت پرتو لیزر NDYAG میله‌ای، نمایه مکانی (G_x) را طبق رابطه (۷) در نظر گرفتیم؛



شکل ۳. شکل های ستون سمت چپ نشانگر نمایه‌های پالس لیزر به‌عنوان منبع اپتو آکوستیک و شکل‌های سمت راست نتیجه حاصل از حل معادله (۱) به‌ازای منبع اپتو آکوستیکی ارائه شده در رابطه (۸) است. ردیف اول نمایه‌های زمانی؛ ردیف دوم توزیع مکانی شدت پالس و ردیف سوم نمای سه‌بعدی پالس را نمایش می‌دهد.

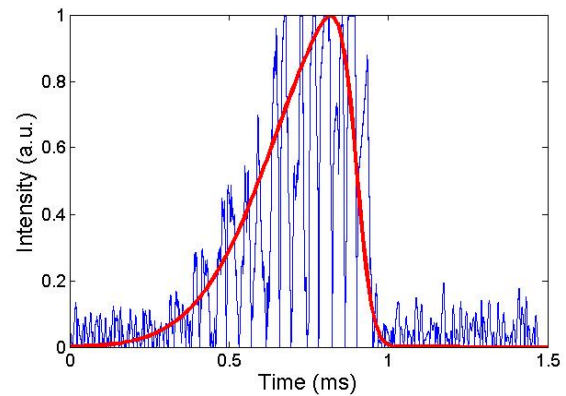
افزایش می‌یابد. میرایی در ورق‌های ضخیم‌تر طبعاً به دلیل فضای بیشتر برای جذب است. همچنین در آزمایش‌های انجام شده، قاعده کلی مشابه بودن پروفایل صوتی با پروفایل لیزر مشاهده شد.

برای اطمینان از صحت آزمایش و انجام مقایسه با یک مرجع مطمئن، نتایج برخی تست‌ها را با اسپکتروگرام صوتی (AudioTool-J5) مقایسه کرده و نتایج را در شکل ۵ ارائه کردیم. شکل ۵ الف نشان‌دهنده طیف فرکانسی امواج صوتی تولید شده از لیزر با قله فرکانس ۴۴۶ هرتز است که هنگام عملکرد آزاد لیزر ثبت شده است و نشانگر فرکانس موج صوتی غالب در محیط تست است.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، پهنای سیگنال دریافتی از تابش مستقیم لیزر روی فوتودیود حدود ۰/۷ میلی‌ثانیه است؛ بنابراین طبق قاعده کلی مشابه بودن پروفایل صوتی با پروفایل لیزر مولد صوت، انتظار می‌رود این پالس در برخورد با بلوک تبدیل فرکانس حدود ۱۴۳۰ هرتز را ایجاد کند. در شکل ۵ ب فرکانس ۱۲۴۳ هرتز ناشی از برخورد لیزر با ورق با ضخامت ۲ میلی‌متر دیده می‌شود که حدود ۱۳ درصد از فرکانس مورد انتظار ۱۴۳۰ هرتز پایین‌تر است. همچنین در شکل ۵ ج، فرکانس ۸۸۸ هرتز ناشی از برخورد لیزر با ورق با ضخامت ۱ میلی‌متر مشاهده می‌شود که حدود ۳۷ درصد از مقدار مورد انتظار کمتر است.

نکته قابل توجه دیگر این است که فرکانس صوت ایجاد شده جدای از پارامترهای لیزر وابستگی مستقیم به ابعاد هدف دارد و فقط با تنظیم پارامترهای لیزر نمی‌توان به فرکانس دلخواه رسید.

با استفاده از نرم‌افزار متلب در شکل ۴ سیگنال دریافتی توسط فوتودیود و جواب معادله (۱) به ازای منبع اپتوآکوستیکی برازش شده با معادله (۸)، هم‌زمان نمایش داده شده است. افت و خیز شدت که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، ناشی از حرکت الگوی تداخلی روی فوتودیود است. سیگنال‌های کم دامنه شکل ۴ نشان‌دهنده عبور سریع الگوی تداخلی و سیگنال‌های با دامنه بیشتر نشان‌دهنده عبور آهسته‌تر الگو است. چنانچه از شکل پیداست، تطابق نسبتاً بالایی بین نتیجه آزمایش و حل معادله موج برقرار است. به نظر می‌رسد در قله سیگنال دریافتی، فوتودیود به اشباع رفته است و این امکان وجود دارد که با بازبهبود سیگنال دریافتی برازش بهتری بین جواب معادله (۱) و سیگنال دریافتی برقرار شود.



شکل ۴. سیگنال دریافت شده با فوتودیود در برخورد منبع اپتوآکوستیکی با ورق فلزی با ضخامت ۵ میلی‌متر، جواب حاصل از معادله (۱) به ازای منبع اپتوآکوستیکی رابطه (۸) نیز در شکل نمایش داده شده است.

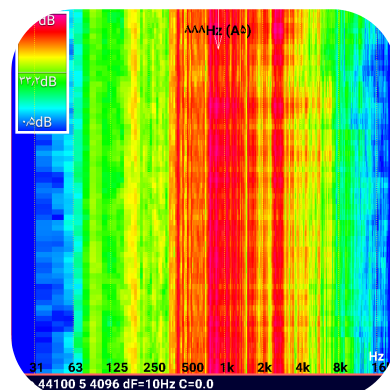
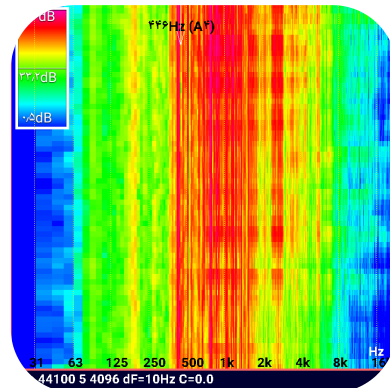
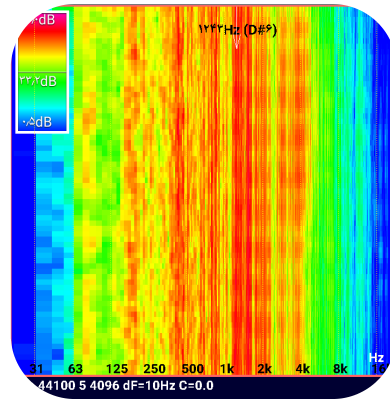
نتایج به دست آمده از آزمایش نشان داد که با تغییر عرض پالس منبع اپتوآکوستیکی، عرض پالس خروجی تغییر می‌کند. از این نتیجه می‌توان برای مدولاسیون عرض پالس استفاده نمود، در واقع پهنای پالس سیگنال دریافتی، رابطه تقریباً خطی با پهنای پالس منبع اپتوآکوستیکی دارد.

در بخشی از آزمایش، اثر تغییر ضخامت بلوک تبدیل را بر پالس دریافتی بررسی کردیم. به نظر می‌رسد، افزایش ضخامت ورق فلزی و در نتیجه افزایش سرعت میرا شدن ارتعاشات تأثیر معکوس بر پهنای پالس دارد؛ به این معنا که هر چه ضخامت ورق فلزی زیر تابش بیشتر می‌شود، پهنای پالس دریافتی کاهش یافته و فرکانس صوت ایجاد شده

یک لیزر NdYAG با فوتودیود ثبت شد. با تخمین این نمایه در یک رابطه ریاضی و استفاده از این منبع اپتوآکوستیکی در معادله موج، مشخصات نظری پالس صوت ایجاد و محاسبه شد. در ادامه با ثبت نمایه صوت ایجاد شده با یک میکروفون لیزری، نتیجه تجربی به دست آمده را با نمایه محاسبه شده با معادله موج مقایسه کردیم که از تطابق نسبتاً خوبی برخوردار بود. تغییر پهنای پالس منبع اپتوآکوستیکی، اثر مستقیم بر پهنای پالس صوت ایجاد شده را نشان داد. همچنین مشاهده شد که تغییر ضخامت بلوک تبدیل با پهنای پالس صوت ایجاد شده رابطه معکوس دارد. به علاوه پدیده مورد بحث با اسپکتروگرام صوتی صحه‌سنجی و تأیید شد.

مراجع

- [1] Patel CKN, Tam AC. Pulsed optoacoustic spectroscopy of condensed matter. Review of modern physics. 1981; 53:517.
- [2] Akhmanov SA, Gusev VE, Karabutov AA. Pulsed laser optoacoustics: Achievements and perspective. Infrared Physics. 1989 May 1;29(2-4):815-38.
- [3] Akhmanov SA, Gusev VE. Laser excitation of ultrashort acoustic pulses: New possibilities in solid-state spectroscopy, diagnostics of fast processes and nonlinear acoustics. Physics-Uspkhi. 1992;35(3):153-91.
- [4] Gauster WB, Habing DH. Physical review letters. 1967 Jun 12;18(24)1058.
- [5] Pidgeon CR, Wherrett BS, Johnston AM, Dempsey J, Miller A. Two-photon absorption in zinc-blende semiconductors. Physical Review Letters. 1979 Jun 25;42(26):1785.
- [6] Thomsen C, Strait J, Vardeny Z, Mavis HJ, Tanc J, Hauser JJ. Coherent phonon generation and detection by picosecond light pulses. Physical review letters. 1984 Sep 3;53(10):989.
- [7] Tom HW, Aumiller GD, Brito-Cruz CH. Time resolved study of laser-induced disorder of Si surfaces. Physical review letters. 1988 Apr 4;60(14):1438.
- [8] Murnane MM, Kapteyn HC, Falcone RW. High-density plasmas produced by ultrafast laser pulses. Physical review letters. 1989 Jan 9;62(2):155.
- [9] Ko SH, Ryu SG, Misra N, Pan H, Grigoropoulos CP, Kladias N, et al. Laser induced short plane acoustic wave focusing in water. Applied physics letters. 2007 Jul 30;91(5):051128.



شکل ۵. طیف‌های صوت دریافت شده به وسیله اسپکتروگرام، شکل بالا (الف) صوت ایجاد شده هنگام عملکرد لیزر در فضای آزاد، فرکانس موج صوتی غالب (بیشترین دامنه) فرکانس ۴۴۶ هرتز را نشان می‌دهد؛ شکل وسط (ب) صوت دریافت شده در برخورد پالس لیزر با ورق فلزی با ضخامت ۲ میلی‌متر، فرکانس غالب ۱۲۴۳ هرتز را نشان می‌دهد؛ شکل پایین (ج) صوت دریافت شده در برخورد پالس لیزر با ورق فلزی با ضخامت ۱ میلی‌متر، فرکانس غالب ۸۸۸ هرتز را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که فرکانس‌های ذکر شده در بیشترین شدت توسط اسپکتروگرام ثبت شده است.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش پس از مرور اجمالی پدیده تولید صوت با لیزر و معرفی معادله حاکم بر این پدیده، نمایه زمانی پالس

پی نوشت

1. Step by step

۲. منابع اپتو آکوستیک: سامانه لیزر و ماده تحت برهم کنش با پرتو لیزر جهت ایجاد صوت.

3. Interband light absorption

4. Nyquist

[10] Ko SH, Ryu SG, Misra N, Pan H, Grigoropoulos CP, Kladias N, Panides E, Domoto GA. Laser induced plane acoustic wave generation, propagation, and interaction with rigid structures in water. *Journal of Applied Physics*. 2008 Oct 1;104(7):073104.

[11] L'Etang A, Huang Z. FE simulation of laser generated surface acoustic wave propagation in skin. *Ultrasonics*. 2006 Dec 22;44:e1243-7.

[12] He H, Feng S. Ultrashort pulse laser used to generate sound under water. *Technical Digest. CLEO/Pacific Rim'99. Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (Cat. No. 99TH8464) ;1999; Seoul, South Korea. IEEE. Vol. 2. p. 336-7.*