

مقابله غیرعامل با شنود لیزری با استفاده از مواد ضد بازتاب

حمید مرندی^۱، سید عباس وزیري^{۲*}، جواد خلیلزاده^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، ۳- دانشیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۴/۰۷/۰۴، پذیرش: ۹۵/۰۲/۱۲)

چکیده

در این مقاله، مقابله با شنود لیزری با استفاده از لایه‌های نازک جاذب نشانده‌شده روی شیشه جلوی منبع مکالمه، به صورت تجربی بررسی شده است. برای انجام این کار، نمونه‌های دارای پوشش تک، دو و سه لایه متشکل از مواد TiO_2 ، Al_2O_3 و MgF_2 ساخته و استفاده شد. لایه نشانی با روش تبخیر و با تغنگ پرتو الکترونی بر روی زیر لایه شیشه BK7 انجام گردید. در مراحل لایه نشانی، ضخامت اپتیکی توسط ضخامت سنج کنترل شد. به منظور بررسی تأثیر لایه‌های ضد بازتاب، درصد بازتابش و شدت نسبی طیف پرتو لیزر حاصل از بازتاب از سطح نمونه لایه نشانی شده، اندازه‌گیری شد. همچنین، با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز TFD Scope، نمودار صوتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که برای نمونه پوشش داده‌شده حاوی سه لایه TiO_2 ، Al_2O_3 و MgF_2 در طول موج ۶۳۲/۸ نانومتر، درصد بازتاب پرتو لیزر به شدت کاهش یافته و به کمتر از ۱ درصد می‌رسد.

کلید واژه‌ها: شنود لیزری، مقابله غیرعامل، روش‌های فیزیکی، لایه نشانی

Passive Laser Listening Countermeasure using Antireflection Materials

H. Marandi, S. A. Vaziri*, J. Khalilzadeh

Imam Hossein University

(Received: 26/09/2015; Accepted: 01/05/2016)

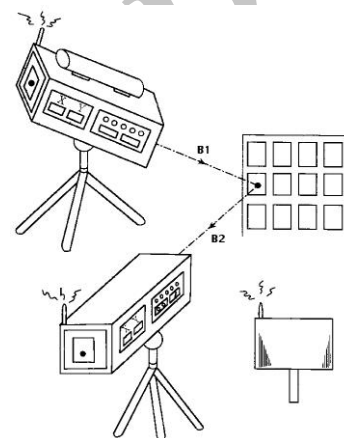
Abstract

In this research, laser listening countermeasure using absorbing layers deposited on surface of glass, which is located in front of the sound source was investigated experimentally. To do this, samples with one, two and three-layers of Al_2O_3 , TiO_2 , MgF_2 , have made and used. Deposition performed by evaporation technique on BK7 glass substrate using electron gun beam. During the deposition, the optical thickness was controlled by the thickness monitoring system. Reflectance of layers and relative intensity of the reflected beam from the coated glass surface were measured due to investigation of the effect of anti-reflective layers. Using the TFD Scope simulation software the sound graph was evaluated too. The results showed that at 632.8 nm laser wavelength, the sample coated by three layers of Al_2O_3 and TiO_2 , MgF_2 significantly reduces the reflection of the laser beam to less than one percent.

Keywords: Laser Listening, Passive Countermeasure, Physical Methods, Coating

۱. مقدمه

امروزه استفاده از لیزر در کاربردهای مختلفی همچون ذوب لیزری، آلیاژسازی لیزری و شنود لیزری^۱ متداول شده است [۱-۴]. در شنود لیزری، پرتو لیزر^۲ موج پیوسته^۳ (CW) مدوله شده^۴ در طول موج نامرئی و فرکانس قابل شنیدن، از یک فرستنده به سمت شیشه پنجره ساختمان تابانده شده و بازتاب آن توسط یک آشکارساز نوری^۵ دریافت و به صورت سیگنال‌هایی که بتوانند به صدا تبدیل شوند، آشکار می‌شود. چنین دستگاه‌هایی به میکروفون لیزری^۶ نیز تعبیر شده‌اند. در شکل (۱) نمایش ساده‌ای از سامانه شنود لیزری نشان داده شده است [۱ و ۵ و ۶].



شکل ۱. نمایش ساده شنود لیزری از طریق شیشه پنجره

دو روش عمده الکترونیکی و فیزیکی برای مقابله با شنود لیزری وجود دارد که روش فیزیکی عمدتاً غیرعامل می‌باشد. نمونه‌هایی از روش‌های الکترونیکی، جرم‌ها، مبدل‌های نیروی الکترومکانیکی هستند که متشکل از یک قطعه تشدیدگر نصب شده بر روی شیشه جهت تولید نویز [۷] و دستگاه‌های ضد استراق‌سمع^۷ مبتنی بر فرستنده و گیرنده به گونه‌ای که در قسمت اول امواج صوتی به امواج الکتریکی تبدیل شده و به صورت بسته‌های آکوستیکی به گیرنده ارسال می‌شود و در قسمت دوم، امواج الکتریکی تولید شده دریافت و دوباره به امواج صوتی تبدیل می‌شوند [۸].

از جمله روش‌های فیزیکی می‌توان به ساختار پنجره ضد استراق‌سمع با استفاده از ایجاد تداخل صوتی [۹]، فیلتر عبوری تداخلی چندلایه^۸ مادون قرمز اشاره کرد [۱۰].

در مطالعات انجام شده مشخص شد که در کاربردهای گوناگون از جمله کنترل دما در گلخانه‌ها و همچنین ذخیره انرژی و جلوگیری از ورود گرمای بیرونی به درون منزل و یا محیط کار، از ورق‌های پلی‌کربنات‌های جاذب مادون قرمز [۱۱]، ویندوفیلیم‌های بازتاب‌کننده^۹ و جاذب مادون قرمز [۱۵-۱۲]، ترکیبات جاذب مادون قرمز در ساخت شیشه [۱۸-۱۶] استفاده می‌شود.

البته لایه نشانی پوشش‌های ضد بازتاب به منظور کنترل میزان عبور، جذب و یا بازتاب انتخابی اشعه و نور خورشید نیز استفاده شده است [۱۹-۳۵].

از آنجاکه یکی از اصول شنود لیزری بازتاب پرتو لیزر و دریافت آن توسط آشکارساز می‌باشد، لذا به منظور جلوگیری از بازتاب پرتو لیزر و به تبع آن مقابله غیرعامل با شنود لیزری، در این تحقیق از روش لایه نشانی پوشش‌های ضد بازتاب جهت کاهش بازتاب پرتو لیزر و بررسی امکان‌سنجی مقابله غیرعامل با شنود لیزری با استفاده از مواد ضد بازتاب الهام گرفته شده است. گرچه اصولاً در سامانه‌های واقعی شنود، به دلیل محرمانه بودن این عمل، لازم است از طول موج‌های فرورسرخ لیزری استفاده شود اما به دلیل یکسان بودن مبانی و روش کار و نیز باتوجه به شرایط موجود، باریکه لیزری مورد استفاده در محدوده طول موج ۶۳۲/۸ نانومتر انتخاب گردید. لایه نشانی ضد بازتاب شامل چند لایه نازک با کسری از طول موج مورد نظر است [۲۷] که بسته به کاربرد شامل چندلایه تا چندصد لایه از دو یا چند ماده مختلف بوده [۲۸] و به گونه‌ای انتخاب گردیده که با استفاده از معادله (۱)، ضریب شکست پوشش، بهینه باشد [۳۲].

$$n_{AR} = \sqrt{n_0 n_{SI}} \quad (1)$$

در معادله (۱) n_{AR} ضریب شکست پوشش ضد بازتاب، n_0 ضریب شکست هوا، n_{SI} ضریب شکست زیرلایه در طول موج ۶۳۲/۸ نانومتر است [۳۳].

ضخامت اپتیکی نیز برای داشتن کم‌ترین بازتاب از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$d_{AR} = \frac{n_{\lambda_0}}{4n_{AR}} \quad (2)$$

در معادله (۲) d_{AR} ضخامت اپتیکی پوشش ضد بازتاب برحسب نانومتر، λ_0 طول موج برحسب نانومتر، n_{AR} ضریب شکست پوشش ضد بازتاب و n عدد فرد مثبت است [۳۴].

هاسگاو و همکاران ضخامت پوشش ضد بازتاب یک نمونه سه لایه را به ترتیب یک چهارم، یک دوم و یک چهارم طول موج مورد نظر و به شرح زیر انتخاب کرده‌اند [۳۵]:

۱- لایه اول از مواد دی‌الکتریک با ضریب شکست بین ۱/۶۰ تا ۱/۷۵ و ضخامت ۷۵۰ تا ۹۵۰ آنگستروم

^۱Laser Listening

^۲Laser Beam

^۳Continuous Wave

^۴Modulation

^۵Photodetector

^۶Laser Microphon

^۷Anti-Eavesdropping Window Structure

^۸Multilayer Interference Transmittance Filter

^۹Anti Reflection Coatings

عملکرد و اثر نمونه‌های مختلف برای مقابله با شنود لیزری مورد مطالعه قرار گرفت. نمونه تک‌لایه TiO_2 با استفاده از ذرات ۲۰ نانومتری دی‌اکسیدتیتانیوم با ضخامت $\lambda/4$ طول موج مورد نظر بر روی زیرلایه BK7 لایه نشانی شده است.

نمونه ضدبازتاب دولایه ترکیبی از دولایه SiO_2 و TiO_2 می‌باشد که در آن SiO_2 به‌عنوان ماده‌ای با ضریب شکست پایین معادل $1/48$ در لایه اول و TiO_2 به‌عنوان ماده‌ای با ضریب شکست بالا معادل $2/17$ در لایه دوم قرار می‌گیرد. ضخامت هر دو لایه SiO_2 و TiO_2 در این آزمایش $\lambda/4$ در نظر گرفته می‌شود.

لایه نشانی ضدبازتاب سه لایه به‌گونه‌ای است که در آن لایه اول اکسیدآلومینیم (Al_2O_3) با ضریب شکست $1/62$ به‌عنوان یک ماده با ضریب شکست متوسط و به‌ضخامت $\lambda/4$ (ربع طول موج مورد نظر) روی زیرلایه شیشه BK7 پوشش داده شده است. لایه دوم اکسیدتیتانیوم (TiO_2) با ضریب شکست $2/2$ به‌عنوان یک ماده با ضریب شکست بالا و به ضخامت $\lambda/2$ (نصف طول موج مورد نظر) انتخاب شده و برای سومین لایه نیز از منیزیم‌فلوراید (MgF_2) با ضریب شکست $1/38$ به‌عنوان یک ماده با ضریب شکست پایین و به‌ضخامت $\lambda/4$ (ربع طول موج مورد نظر) استفاده شده است.

۲-۳. آزمون‌های انجام‌شده به منظور بررسی تأثیر لایه نشانی مواد ضدبازتاب در مقابله غیرعامل با شنود لیزری

در ابتدا، با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز MACLEOD، نمودار درصد بازتاب پرتو لیزر از سطح هریک از نمونه‌های مزبور رسم و باتوجه به کم‌ترین میزان بازتاب به‌دست‌آمده، نمونه لایه نشانی سه لایه متشکل از مواد TiO_2 ، Al_2O_3 و MgF_2 به‌عنوان نمونه لایه نشانی‌شده اصلی جهت انجام سایر آزمایش‌های اصلی انتخاب شد.

در ادامه به‌منظور اطمینان از عملکرد صحیح نمونه لایه نشانی‌شده سه لایه، با استفاده از اسپکترومتر مدل S100، شدت نسبی طیف بازتابی تابش تضعیف‌شده لیزر و شدت نسبی طیف بازتابی ناشی از بازتاب نور لیزر از سطح لایه نشانی‌شده به‌دست آمد تا بتوان عملاً میزان کاهش بازتاب پرتو لیزر را از سطح لایه نشانی‌شده به‌دست آورد.

برای انجام آزمایش‌های شنود لیزری و بررسی عملکرد نمونه لایه نشانی‌شده، چیدمان سامانه شنود لیزری با استفاده از یک فرستنده پرتو لیزر در ناحیه $632/8$ ، پایه نگه‌دارنده نمونه لایه نشانی‌شده و سامانه آشکارساز انجام شد. در شکل (۲) نمایی از چیدمان سامانه شنود لیزری به‌کاررفته در آزمایش‌های مورد نظر نمایش داده شده است.

۲- لایه دوم از مواد دی‌الکتریک با ضریب شکست بین $1/95$ تا $2/35$ و ضخامت 1050 تا 1350 آنگستروم

۳- لایه سوم از مواد دی‌الکتریک با ضریب شکست بین $1/38$ تا $1/44$ و ضخامت 1100 تا 1200 آنگستروم

باتوجه به مطالب فوق، می‌توان از پوشش ضدبازتاب سه لایه TiO_2 ، Al_2O_3 و MgF_2 به‌نحوی که ضریب شکست لایه اول $1/38$ با ضخامت $\lambda/4$ ، ضریب شکست لایه دوم $2/2$ با ضخامت $\lambda/2$ و ضریب شکست لایه سوم $1/62$ با ضخامت $\lambda/4$ باشد استفاده نمود.

۲. مواد، تجهیزات و روش

۲-۱. مواد و تجهیزات

در چیدمان آزمایشگاهی این تحقیق از لیزر هلیوم نئون با مشخصات فنی (طول موج: $632/8$ نانومتر، قطر لکه: 1 سانتی‌متر، توان: 5 میلی‌وات)، اسپکترومتر مدل S100 (بازه طیفی 300 تا 1200 نانومتر) شیشه BK7، دستگاه اسپلوسکوپ و نرم‌افزار مربوطه، نمونه لایه نشانی‌شده تک‌لایه (TiO_2)، نمونه لایه نشانی‌شده دولایه (TiO_2 ، SiO_2) و نمونه لایه نشانی‌شده سه لایه (Al_2O_3 ، TiO_2 ، MgF_2) استفاده شد.

۲-۲. روش تهیه نمونه‌های لایه نشانی‌شده

انتخاب مواد جهت لایه نشانی و ترتیب قرارگرفتن آن‌ها بر روی هم و همچنین ضخامت هر لایه و رسم نمودار میزان بازتاب نور از فیلتر به‌دست‌آمده، بر اساس قوانین تداخل امواج الکترومغناطیس و ضریب شکست هر ماده و با استفاده از محاسبات ریاضی توسط نرم‌افزار شبیه‌ساز MACLEOD انجام شده است. در این بخش از سه نمونه تک‌لایه (TiO_2)، دولایه (SiO_2+TiO_2) و سه‌لایه (TiO_2 ، Al_2O_3 و MgF_2) استفاده گردید.

لایه نشانی‌ها با روش تبخیر با تفنگ الکترونی^۱ در فشار 5×10^{-6} میلی‌بار و در دمای 200 درجه سانتی‌گراد و با ولتاژ 6 کیلوولت بر روی زیرلایه شیشه BK7 انجام شده و ضخامت‌سنجی به‌وسیله ضخامت‌سنج اپتیکی کنترل شده است.

برای تمیزکردن سطح مورد نظر جهت لایه نشانی، زیرلایه شیشه در دستگاه فراصوتی^۲ به‌مدت 15 دقیقه در محلول اسیدکلریدریک $0/2$ مولار جرم‌گیری و سپس به‌مدت 15 دقیقه در محلول استون قرار گرفته و در نهایت با آب مقطر شست‌وشو داده شده و با گاز نیتروژن خالص خشک گردیده است.

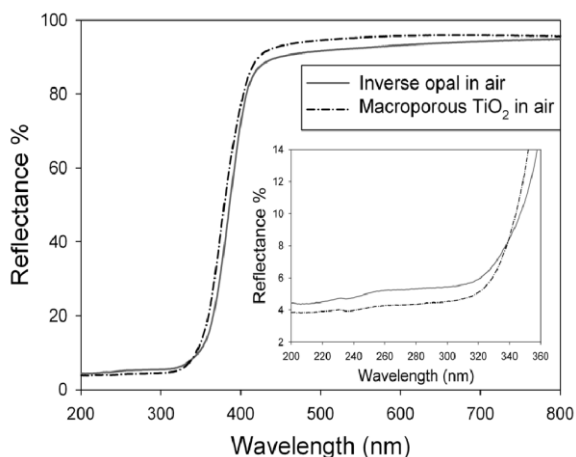
سه نمونه تک‌لایه، دولایه و سه‌لایه به‌منظور بررسی نحوه

¹ Coating

² Electron Beam Gun

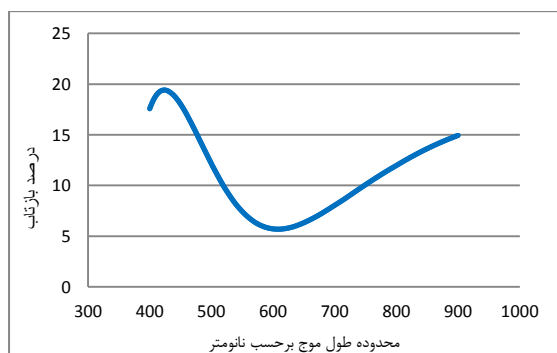
³ Ultrasonic

همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، درصد بازتاب لیزر از روی سطح شیشه BK7، در کم‌ترین میزان و در محدوده نزدیک به ۸۰۰ نانومتر، بیش از ۷/۷ درصد می‌باشد که برای جلوگیری از شنود لیزری می‌بایست به‌گونه‌ای عمل نمود تا بازتاب لیزر به حداقل ممکن رسیده و به صفر نزدیک شود. شکل (۴)، طیف بازتاب از پوشش لایه نشانی‌شده TiO_2 را نشان می‌دهد.

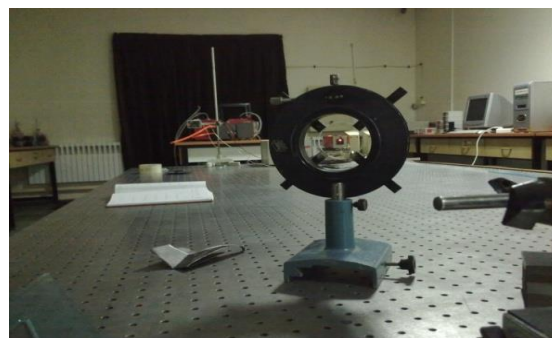


شکل ۴. نمودار طیف بازتاب TiO_2

مطابق شکل (۴) مشخص است که پوشش لایه نشانی‌شده TiO_2 در محدوده طول موج کم‌تر از ۳۰۰ نانومتر دارای بازتاب کم‌تر از ۵ درصد بوده ولی در محدوده ۴۰۰ به بالا، بازتاب آن بسیار زیاد و نزدیک به ۹۰ درصد می‌باشد که عملاً عدم کارایی آن برای مقابله با شنود لیزری محرز می‌گردد. در آزمایش‌های انجام‌شده بر روی پوشش تک‌لایه TiO_2 نیز عملاً تغییر محسوسی در کاهش بازتاب پرتو لیزر مشاهده نگردید و صدای پشت شیشه همچنان قابل شنیدن بود. نمودار درصد بازتاب نمونه لایه نشانی دولایه TiO_2+SiO_2 برای محدوده ۶۳۲ نانومتر در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵. نمودار درصد بازتاب نمونه لایه نشانی دولایه TiO_2+SiO_2 برای محدوده ۶۳۲/۸ نانومتر



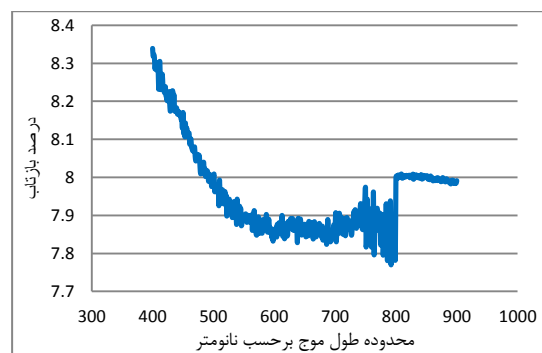
شکل ۲. نمایی از چیدمان سامانه شنود لیزری

در پایان، صدای حاصل از دریافت امواج توسط آشکارساز به‌وسیله نرم‌افزار صوتی Music Morpher Gold ضبط، و با استفاده از نرم‌افزارهای ویرایش صدا مانند Cool Record Edit، نسبت به حذف نویزهای حاصله اقدام شد. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز TFD Scope، نمودار صوت حاصل از شنود لیزری که توسط آشکارساز به‌دست آمده، بر اساس دسی‌بل برحسب فرکانس ترسیم و مورد بررسی قرار گرفته است.

۳. نتایج و بحث

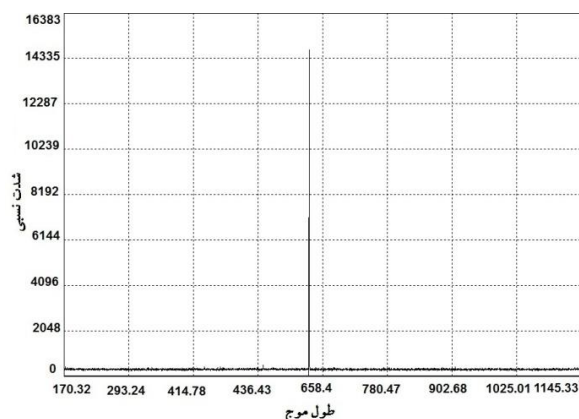
۳-۱. بررسی نمودار درصد بازتاب نمونه‌های لایه نشانی‌شده

باتوجه به این‌که مکانیسم شنود لیزری به‌گونه‌ای است که از تاباندن نور لیزر بر روی شیشه و دریافت بازتاب آن صدای تولیدشده در پشت هدف (شیشه) قابل شنیدن خواهد بود، لذا ملاک عمل برای مقابله غیرعامل با شنود لیزری در این تحقیق، کاهش میزان بازتاب پرتو لیزر در نظر گرفته شده است. به‌همین منظور، برای مقایسه اثر لایه نشانی نمونه‌های موردنظر بر روی بازتاب لیزر با نمونه‌های بدون پوشش، در ابتدا طیف بازتاب لیزری زیرلایه (شیشه BK7) حاصل شد تا بتواند به‌عنوان معیار اندازه‌گیری در نمونه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. در شکل (۳) درصد بازتاب لیزر از زیرلایه شیشه BK7 نشان داده شده است.

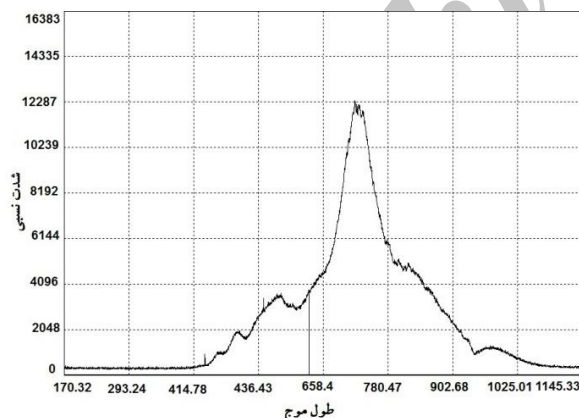


شکل ۳. نمودار درصد بازتاب شیشه BK7 بدون لایه نشانی برای محدوده ۶۳۲/۸ نانومتر

همان‌گونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، شدت نسبی پرتو لیزر بسیار زیاد و به حدود ۱۴۵۰۰ رسیده است. بدیهی است که در صورت عدم تضعیف نور مستقیم لیزر و تاباندن پرتو کامل لیزر به سمت گیرنده اسپکترومتر، شدت نسبی به دست آمده بسیار بیش‌تر از میزان حاصله است. شدت نسبی طیف نور لیزر به دلیل استفاده از پرتو لیزر قرمز ۶۳۲ نانومتر، به صورت یک پیک در همان ناحیه ۶۳۲ نانومتر به دست آمده و در صورتی که از نور معمولی استفاده شود، نمودار حاصله شامل دامنه‌ای از طول موج خواهد بود که در شکل (۸) نمایش داده شده است.



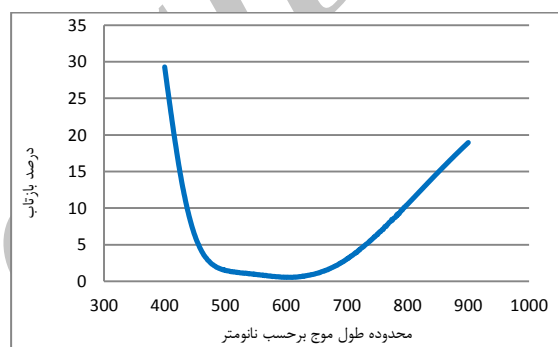
شکل ۷. شدت نسبی طیف نور مستقیم لیزر قرمز با طول موج ۶۳۲/۸ بازتاب یافته از شیشه بدون پوشش و برحسب نانومتر با استفاده از اسپکترومتر مدل S100



شکل ۸. شدت نسبی طیف نور معمولی تابانده شده به گیرنده اسپکترومتر مدل S100

در گام بعدی، با استفاده از نمونه سه لایه TiO_2 ، Al_2O_3 و MgF_2 تابش بازتابی نور مستقیم لیزر بدون این که تضعیف شود به سمت آشکارساز اسپکترومتر هدایت گردید به گونه‌ای که نور لیزر بدون تضعیف مستقیماً به قسمت پشت نمونه لایه نشانی شده تابانده شد و بازتاب آن به طور کامل به سمت آشکارساز هدایت گردید و با وجود این که لایه نشانی مواد ضدبازتاب در طرف دیگر

همان‌طور که از شکل (۵) مشاهده می‌شود، با استفاده از پوشش دولایه $\text{TiO}_2 + \text{SiO}_2$ ، بازتاب لیزر نسبت به نمونه تک‌لایه TiO_2 (شکل ۴) به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و در محدوده ۴۰۰ نانومتر میزان بازتاب به ۲۰ درصد و در محدوده طول موج ۶۳۲/۸ نانومتر که آزمایش‌های مورد نظر انجام می‌شود، میزان آن به حدود ۶ درصد رسیده است. پس از آن نیز مجدداً درصد بازتاب افزایش یافته و به بیش از ۱۵ درصد می‌رسد اما با وجود کاهش میزان بازتاب لیزر از سطح شیشه به نسبت نمونه تک‌لایه TiO_2 ، پوشش دولایه $\text{TiO}_2 + \text{SiO}_2$ نیز عملاً نمی‌تواند موجب جلوگیری از انتقال صوت گردد. درصد بازتاب به دست آمده از نمونه لایه نشانی سه لایه TiO_2 ، Al_2O_3 و MgF_2 در محدوده ۶۳۲ نانومتر در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶. نمودار درصد بازتاب نمونه سه لایه TiO_2 ، Al_2O_3 و MgF_2 برای محدوده ۶۳۲ نانومتر

همان‌طور که از شکل (۶) مشاهده می‌شود، درصد بازتاب لیزر در این نمونه به کم‌تر از یک درصد کاهش یافته که این شرایط برای مقابله با شنود لیزری بسیار مطلوب و قابل قبول بوده و بر همین اساس نمونه لایه نشانی سه لایه TiO_2 ، Al_2O_3 و MgF_2 به عنوان نمونه اصلی برای مقابله با شنود لیزری انتخاب شده و سایر آزمایش‌ها بر روی آن انجام شده است.

۳-۲. بررسی شدت نسبی طیف نور با استفاده از اسپکترومتر مدل S100

به منظور اطمینان از عملکرد صحیح نمونه لایه نشانی سه لایه متشکل از مواد TiO_2 ، Al_2O_3 و MgF_2 ، با استفاده از اسپکترومتر مدل S100، شدت نسبی طیف بازتابی تابش تضعیف شده لیزر و شدت نسبی طیف بازتابی ناشی از بازتاب نور لیزر از سطح لایه نشانی شده به دست آمد. در ابتدا طیف شدت نور مستقیم لیزر در حالت تضعیف شده با استفاده از آینه به گونه‌ای که بخش کمی از نور لیزر منعکس شده از شیشه بدون پوشش به گیرنده اسپکترومتر گسیل داده شود، به دست آمد که در شکل (۷) نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، پیک نمودار حاصله در همان محدوده طول‌موج ۶۳۲ نانومتر اتفاق افتاده است با این تفاوت که این‌بار، کاهش بیش از پیش و بسیار قابل‌قبول شدت نسبی طیف پرتو لیزر را در پی داشته است که این کاهش به‌دلیل عملکرد صحیح لایه ضدبازتاب سه لایه TiO_2 ، Al_2O_3 و MgF_2 می‌باشد.

پس از مقایسه نمودارهای فوق، مشاهده می‌شود که شدت نسبی بخشی از پرتو لیزر تضعیف‌شده تابانده‌شده بر روی حسگر اسپکترومتر مدل S100 در ناحیه ۶۳۲ نانومتر معادل ۱۴۸۴۷ به‌دست‌آمده درحالی‌که پس از استفاده از فیلتر سه لایه، شدت نور کامل لیزر بازتاب‌شده بدون تضعیف از سطح روی نمونه دارای پوشش سه لایه TiO_2 ، Al_2O_3 و MgF_2 به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یافته و این مقدار به کم‌تر از ۴۰۹۶ رسیده است که این صرفاً به‌دلیل استفاده از ضدبازتاب سه لایه TiO_2 ، Al_2O_3 و MgF_2 بوده است.

۳-۳. بررسی صوت دریافتی بازتابی از زیرلایه BK7 و نمونه لایه نشانی‌شده سه لایه TiO_2 ، Al_2O_3 و MgF_2 در سامانه شنود لیزری

آزمایش‌های شنود لیزری جهت تشخیص صوت توسط سامانه شنود لیزری شرح داده‌شده در بخش تجربی، انجام شد. برای این منظور ابتدا شرایط آزمایشگاهی در محیط کاملاً تاریک جهت به حداقل رساندن اثر نویز نور محیط بر روی آشکارساز فراهم گردیده و سامانه شنود لیزری به‌گونه‌ای طراحی شد که پرتو لیزر از چشمه تولیدکننده لیزر قرمز با طول‌موج ۶۳۲/۸ نانومتر به‌سمت هدف (شیشه یا نمونه لایه نشانی‌شده) گسیل داده شده و از آنجا به‌سمت حسگر اپتیک لیزری گیرنده پرتو لیزر بازتاب شود.

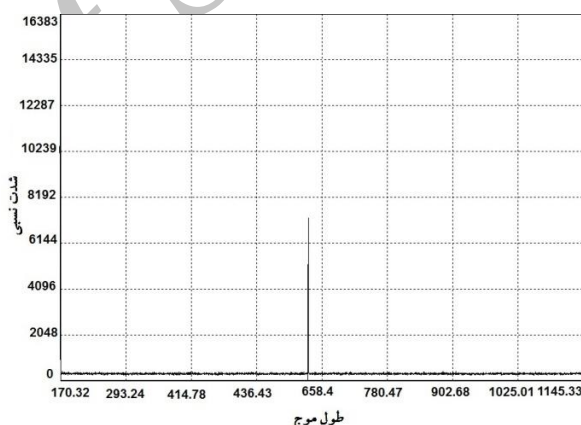
پس از ایجاد شرایط مناسب آزمایشگاهی و از بین بردن عوامل تولیدکننده نویز، ابتدا برای این‌که بتوان میزان نویز ذاتی آشکارساز را اندازه‌گیری نمود، شدت صدای ضبط‌شده برحسب دسی‌بل در شرایطی که هیچ‌گونه صدا و نوری وجود نداشته و منبع نور لیزر نیز فعال نبود، اندازه‌گیری شد که میزان آن در شکل (۱۱) قابل مشاهده می‌باشد.

باتوجه به شکل (۱۱) مشخص است که نویز ذاتی آشکارساز بسیار ناچیز بوده و در محدوده ۱ و ۲ کیلوهرتز افزایش اندکی داشته و در سایر محدوده‌ها قابل مشاهده نمی‌باشد. در ادامه، ضمن تاباندن پرتو لیزر بازتاب‌یافته از سطح زیرلایه شیشه BK7 (بدون پوشش) و درحالی‌که هیچ‌گونه صوتی پخش نگردید، میزان نویز آشکارساز در برخورد پرتو لیزر بازتابی مورد ارزیابی قرار گرفت که نتیجه آن در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

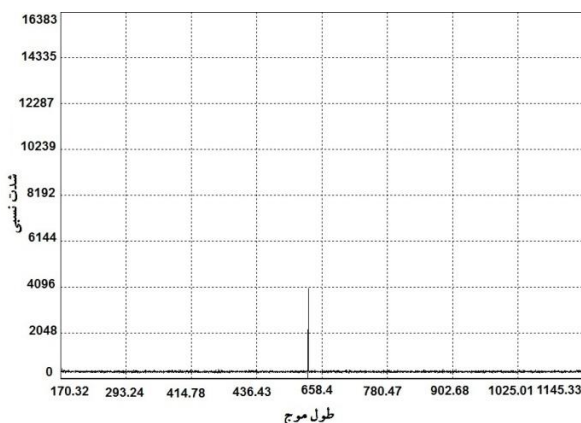
زیرلایه قرار داشته و بازتاب کامل نور لیزر مستقیماً به آشکارساز رسیده بود، با این حال کاهش قابل ملاحظه شدت نسبی طیف نوری مربوطه تا حدود ۷۵۰۰ حاصل گردید که در شکل (۹) نشان داده شده است. به‌عبارتی پس از استفاده از قسمت پشت نمونه لایه نشانی‌شده حدود ۵۰٪ کاهش در بازتاب مشاهده می‌شود.

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، پیک نمودار به‌دلیل استفاده از لیزر ۶۳۲ نانومتر، در همان محدوده وجود داشته ولی به‌دلیل استفاده از پوشش ضدبازتاب در پشت شیشه، شدت بازتاب کاهش‌یافته و از آنجا که بازتاب پرتو لیزر از قسمت پشت نمونه اتفاق افتاده است، لذا پیش‌بینی می‌شود قسمت روی نمونه عملکرد بسیار مطلوب‌تری داشته باشد.

در پایان نیز بازتاب مستقیم و کامل پرتو لیزر تضعیف‌نشده از روی شیشه یعنی سمتی که لایه نشانی شده است بر روی آشکارساز هدایت شد که در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

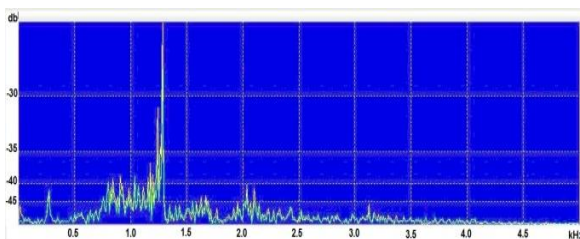


شکل ۹. شدت نسبی طیف نور مستقیم لیزر پس از بازتاب قسمت پشت نمونه لایه نشانی‌شده ضدبازتاب (سه لایه) با استفاده از اسپکترومتر مدل S100

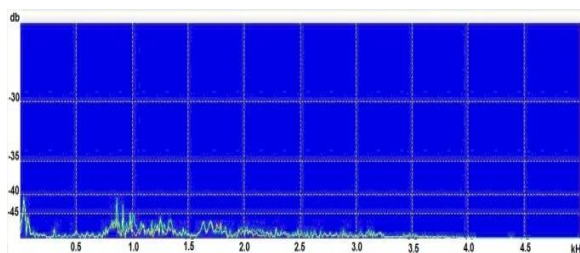


شکل ۱۰. شدت نسبی طیف نور مستقیم لیزر پس از عبور از قسمت جلوی نمونه لایه نشانی‌شده ضدبازتاب (سه لایه) با استفاده از اسپکترومتر مدل S100

در ادامه، نمونه لایه نشانی شده سه لایه TiO_2 ، Al_2O_3 و MgF_2 جایگزین شیشه بدون پوشش شده و آزمایش شنود لیزری با شرایط قبلی و درحالی که صدا از منبع تولید صوت در پشت نمونه لایه نشانی شده در حال پخش بود تکرار شد (شکل ۱۴). از مقایسه نتایج بر اساس شکل‌های (۱۴) و (۱۳)، ملاحظه می‌شود که پیک ناشی از صدای دریافتی در آزمایش قبلی از بین رفته و نمودار حاصل از آن شباهت زیادی به شکل (۱۱) دارد و مفهوم آن این است که صدای دریافتی ناشی از نویز پس‌زمینه و بخش ناچیزی از پرتو بازتابی لیزر است.



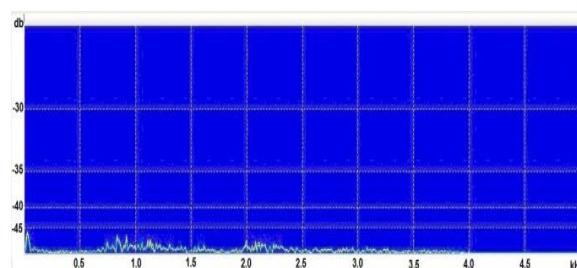
شکل ۱۳. نمودار صدای ضبط شده حاصل از ارتعاشات صوتی سطح نمونه شیشه BK7 بدون پوشش توسط خروجی مدار حس‌گر دریافت‌کننده لیزر



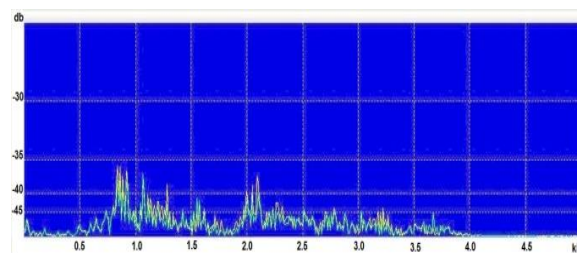
شکل ۱۴. نمودار صدای ضبط شده از خروجی آشکارساز با پوشش سه لایه

۴. نتیجه‌گیری

آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق نشان داد که لایه نشانی شده تک‌لایه TiO_2 برای مقابله با شنود لیزری نمی‌باشد یا استفاده از پوشش دو لایه $\text{TiO}_2 + \text{SiO}_2$ ، هرچند بازتاب پرتو لیزر نسبت به نمونه تک‌لایه TiO_2 به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یافته و در محدوده طول موج $632/8$ نانومتر میزان آن به حدود ۶ درصد می‌رسد، لیکن پوشش دو لایه $\text{TiO}_2 + \text{SiO}_2$ نیز عملاً نمی‌تواند موجب جلوگیری از انتقال صوت گردد. نتایج نشان داد که با استفاده از پوشش سه لایه TiO_2 ، Al_2O_3 و MgF_2 در ناحیه $632/8$ نانومتر، درصد بازتاب پرتو لیزر به‌شدت کاهش یافته و به کم‌تر از ۱ درصد رسید. در عمل نیز پس از انجام آزمایش شنود لیزری، امکان شنود لیزری وجود نداشت. لذا امکان استفاده از این روش برای مقابله غیرعامل با شنود لیزری در نواحی مختلف طیفی از جمله فرسرخ با لایه نشانی‌های مختلف وجود دارد.



شکل ۱۱. نمودار نویز ذاتی آشکارساز لیزر بدون تابش نور بازتابی لیزر



شکل ۱۲. نمودار نویز ضبط شده از خروجی مدار حس‌گر دریافت‌کننده لیزر حاصل از بازتاب نور لیزر از نمونه شیشه BK7 بدون پوشش و بدون صدا

همان‌گونه که از نمودار فوق به‌دست می‌آید، در اثر بازتاب نوب لیزر، میزان نویز دریافتی به‌میزان قابل توجهی افزایش یافته و از شدت و ضعف در محدوده $0/5$ تا 4 کیلوهرتز برخوردار است که در ناحیه نزدیک به 1 و 2 کیلوهرتز از شدت بیشتری برخوردار بوده و دارای نقاط پیک می‌باشد. در این مرحله ضمن تأیید عملکرد سامانه آشکارساز، مشخص می‌شود که میزان امواج دریافت شده در این مرحله بسیار بیش‌تر از حالت قبل بوده و پس از تقویت و تبدیل امواج به صدای قابل شنیدن، صدای خش‌خش ناشی از برخورد پرتو بازتابی لیزر از سطح شیشه به حس‌گر اپتیکی آشکارساز، از بلندگوهای نصب شده قابل شنیدن بود.

در گام بعدی منبع تولید صدا در پشت شیشه BK7 بدون پوشش قرار گرفته و پس از تولید صدا، پرتو لیزر حاصل از بازتاب از سطح شیشه به‌صورت مدوله شده به سمت آشکارساز هدایت شد که در قسمت آشکارساز قابل شنیدن بود که پس از آنالیز صوت دریافتی و حذف بخش قابل توجهی از نویز به‌وسیله نرم‌افزارهای صوتی، صدای نسبتاً واضح قابل دست‌یابی می‌باشد.

نمودار به‌دست‌آمده (شکل ۱۳) شباهت بسیار زیادی به نویز حاصل از برخورد پرتو بازتابی لیزر به آشکارساز دارد، با این تفاوت که در ناحیه حدود $1/35$ کیلوهرتز، پیک حاصل از صوت پخش شده نسبت به نمودار نویز ذاتی و نویز زمینه، کاملاً قابل تشخیص بوده و صدای پخش شده در پشت نمونه شیشه BK7 بدون پوشش، توسط بلندگوهای نصب شده در سامانه آشکارساز، به‌طور کامل قابل شنیدن و تشخیص می‌باشد.

۵. مراجع

- [19] Abbasi, S.; Maleki M. H.; Davodi S.; Hoseinzadeh Lish, I.; Vaez Zade, M. "Optimization of Anti-Reflecting Thin Films of Nd:YAG Laser using the Laser Shock Peening Method and Investigation of Their Laser Induced Damage Thresholds"; Iran Third National Conference on Optical Engineering 2013, 762-767. (In Persian)
- [20] Mukhopadhyay, S.; Yamini, P.; Lea, D. "Anti-Reflective Coatings for Optically Transparent Substrates"; US Patent 8,784,985, 2014.
- [21] Tilsch, M. K.; Robert B. S.; Charles, A. H. "Dielectric Multilayer Filters"; Wavelength Filter Fibre Opt. Springer Berlin Heidelberg, 2006, 289-340.
- [22] Liu, M. C.; Lee, C. C.; Liao, B. H.; Kaneko, M.; Nakahira, K.; K Takano, Y. "Fluoride Antireflection Coatings Deposited at 193 nm"; Appl. opt. 2008, 47, 214-218.
- [23] Tan, M.; Yongchang, L.; Dazun, Z. "Reflection Filter with High Reflectivity and Narrow Bandwidth"; Appl. opt. 1997, 36, 827-830.
- [24] Asghar, M. H.; Shoaib, M.; Placido, F.; Naseem, S. "Modeling and Preparation of Practical Optical Filters"; Curr. Appl. Phys. 2009, 9, 1046-1053.
- [25] Lee, C. C.; Chen, S. H.; Kuo, C. C.; Wei, C. Y. "Achievement of Arbitrary Bandwidth of a Narrow Bandpass Filter"; Optics Express. 2007, 15, 15228-15233.
- [26] Hass, G. "Physics of Thin Films: Advances in Research and Development"; Academic Press: New York and London, 1963.
- [27] Litovchenko, V. G.; Klyui, N. I. "Solar Cells Based on DLC Film-Si Structures for Space Application"; Sol. Energy Mater. Sol. Cell. 2001, 68, 55-70.
- [28] Grill, A. "Electrical and Optical Properties of Diamond-Like Carbon"; Thin Solid Films 1999, 355, 189-193.
- [29] Boulos, E. N.; Mark F. B. "Low Color Purity, Anti-Reflection Coatings for Transparent Glazing Oriented at High Angles of Incidence"; US Patent 5,194,990, 1993.
- [30] Song, M. K.; Yang, W. S.; Kwon, S. W.; Song, Y. S.; Cho, N. I.; Lee, D. Y. "Influence of Deposition Method on Refractive Index of SiO₂ and TiO₂ Thin Films for Anti-Reflective Multilayers"; J. Korean Ceram. Soc. 2008, 45, 524-530.
- [31] Shanbhogue, H. G.; Nagendra, C. L.; Annapurna, M. N.; Thutupalli, M. N. "Multilayer Antireflection Coatings for the Visible and Near-Infrared Regions"; Appl. Opt. 1997, 36, 6339-6351.
- [32] Suzuki, Y.; Gouichi H. "Infrared Absorbent"; US Patent 4,763,966, 1988.
- [33] Hasegawa, S.; Gen M. "Near Infrared Absorption Filter"; US Patent 6,117,370, 2000.
- [34] Roche, S.; Erwan, M.; Laurent, L. "Transparent Substrate with Anti-Reflection Coating"; US Patent 20110100424, 2011.
- [35] Hasegawa, S.; Gen M. "Near Infrared Absorbing Compound"; US Patent 6,388,116, 2002.
- [1] Vaziri, S. A.; Shahverdi, H. R.; Shabestari, S. G.; Torkamany, M. J. "Effect of Beam Interaction Time on Laser Alloying with Pulsed Nd-YAG Laser"; Mater. Sci. Technol. 2009, 25, 1234-1237.
- [2] Vaziri, S. A.; Shahverdi, H. R.; Torkamany, M. J.; Shabestari, S. G. "Effect of Laser Parameters on Properties of Surface-Alloyed Al Substrate with Ni"; Opt. Lasers. Eng. 2009, 47, 971-975.
- [3] Vaziri, S. A.; Shahverdi, H. R.; Shabestari, S. G.; Hazeli, K.; Torkamany, M. J. "Effect of Re-Scanning on Tribological Characterization of Laser Surface Alloyed Layers"; Mater. Des. 2010, 31, 3875-3879.
- [4] Omranian, P.; Shahverdi, H. R.; Torkamany, M. J.; Vaziri, S. A. "The Effects of Nd: YAG Laser Surface Melting Parameters on the Solidification Behavior of Aluminium Surface"; Mater. Focus. 2012, 1, 239-244.
- [5] Moses, James M.; Trout, K. P. "A Simple Laser Microphone for Classroom Demonstration"; Phys. Teach. 2006, 44, 600-603.
- [6] Nakao, M.; Masahiko, H. "Voice Monitoring System using Laser Beam"; US Patent 6,317,237, 2001.
- [7] Cassey, M. C.; Bank, G. "Listening/Anti Eavesdropping Device"; WO Patent 2003009499, 2003.
- [8] Kury, C. A. "Anti-Eavesdropping Device"; US Patent 5,533,131, 1996.
- [9] Derner, P.; Peter, R. "Anti-Eavesdropping Window Structure"; US Patent 4,829,729, 1989.
- [10] Francois F. G.; Gif-sur-Yvette; Jacqueline J. P. "Infrared Interference Filter"; US Patent 3,514,174, 1970.
- [11] Amano, S.; Hasegawa, S.; Masuda, G. "Near Infrared Absorbent Polycarbonate Films"; EP Patent 0,942,039, 2004.
- [12] Kase, M.; Hironobu A. "Window film"; US Patent 5,925,453, 1999.
- [13] Adochio W.; Gaudet G. T.; Rardon D. E.; Still M. A. "Transparent Colorless Infrared Radiation Absorbing Compositions Comprising Nanoparticles"; AU 2014201745, 2014.
- [14] Miyake, Y.; Sakae T. "Near-Infrared Absorbing Transparent Resin Composition and Article Molded Therefrom"; US Patent 5,514,740, 1996.
- [15] Castellion, G. A.; Joseph, P. H. "Plastic optical filter"; US Patent 3,692,688, 1972.
- [16] Hironori, O.; Kazou, T. "Near Infrared Absorption Filter Glass"; US Patent 5,668,066, 1997.
- [17] Yeong, L.; Sunnyvale, G. "Infrared Absorbing Green Glass"; US Patent 5,036,025, 1991.
- [18] Sun, W.; Yu, D. "Near-Infrared Absorption Glass, Element and Filter"; US Patent 13,622,084, 2012.