



انجمن حفاظت در برابر اشعه ایران

مقاله پژوهشی



مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۸، شماره ۲، ویژه‌نامه پرتوهای غیر یون‌ساز، ۱۳۹۸، صفحه ۸-۱

پنجمین کنفرانس ملی سنجش و ایمنی پرتوهای یون‌ساز و غیر یون‌ساز (مهرماه ۱۳۹۷)

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۰۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۰۱

اندازه‌گیری انرژی حاصل از جذب پرتوی غیر یون‌ساز لیزری در آب با استفاده از روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال

امیرمحمد بیگزاده^{۱*}، محمدرضا رشیدیان وزیری^۲ و فرهود ضیائی^۱

^۱ پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.

^۲ پژوهشکده فوتونیک و فن‌آوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.

* تهران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، کدپستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶

پست الکترونیکی: Beigzadeh_am@yahoo.com

چکیده

تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال، روش نوری توانمند و پرکاربردی در زمینه اندازه‌گیری دقیق تغییرات ایجاد شده در مقادیر کمیت‌های فیزیکی نظیر چگالی، ضریب شکست و غیره است. در این مطالعه، چیدمان تجربی تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال برای اندازه‌گیری میزان تغییرات انرژی ایجاد شده در سلول آب حاصل از جذب پرتوی غیر یون‌ساز تابشی از یک لیزر مادون قرمز طراحی و ساخته شده است. از روش نظری کارآمدی برای اندازه‌گیری دز جذبی استفاده شده که مبتنی بر پایش جابه‌جایی نوارهای تداخلی به سبب تغییر محتوای انرژی در ماده جاذب است. نشان داده شده است که نتایج حاصل از روش تداخل‌سنجی توافقی خوبی با نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری با حسگر دمایی دقیق دارد. نتایج تجربی بیانگر قابلیت بکارگیری این روش نوری غیر تماسی و غیر تزامنی برای پایش برخط تغییرات میزان انرژی حاصل از جذب تابش پرتو غیر یون‌ساز لیزری در داخل ماده است.

کلیدواژگان: پرتوهای غیر یون‌ساز، تداخل‌سنجی، تمام‌نگاری، کالریمتری، لیزر مادون قرمز

۱. مقدمه

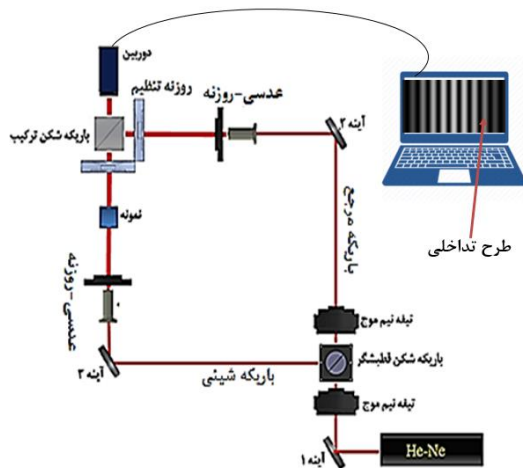
جای فیلم‌های حساس به نور مورد استفاده در تمام‌نگاری کلاسیک، ثبت شده و پس از تحلیل برای اندازه‌گیری بزرگی کمیت‌های خاص مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال برای دزیمتری تابش‌های یون‌ساز، ابتدا در سال ۱۹۷۰ توسط هاسمن [۲ و ۳] و سپس میلر

تمام‌نگاری روشی برای ثبت سه بعدی جبهه موج‌های نوری از طریق سیستم‌های تصویربرداری است. از این روش برای نمایش سه بعدی تصاویر ثبت شده از اجسام استفاده می‌شود. در روش تمام‌نگاری دیجیتال، تمام‌نگاشت با استفاده از روش‌های دیجیتال، به طور مثال با استفاده از یک دوربین به

منظور اندازه‌گیری میزان انرژی آزاد شده ناشی از جذب پرتوهای یون‌ساز در ماده بهره بردند. در این مطالعه روشی ساده و کارآمد برای تخمین میزان انرژی تخلیه شده توسط پرتوهای تابشی غیریونساز در داخل ماده معرفی خواهیم کرد که برپایه روش تجربی تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال بنا نهاده شده است. اساس این روش برپایه ردیابی یکی از نوارهای حاضر در طرح نوارهای تداخلی ایجاد شده توسط یک منبع تابشی غیریونساز از نوع لیزر مادون قرمز به ماده و تحلیل طیف استخراج شده است.

۲. مواد و روش‌ها

شکل ۱ طرح سیستم تداخل‌سنجی ماخ زندر مورد استفاده در کار تجربی را نشان می‌دهد. در این چیدمان تداخل‌سنجی، ابتدا باریکه نوری خارج شده از لیزر پس از بازتاب از آینه ۱ از تیغه نیم‌موج اول عبور می‌کند. سپس باریکه پس از ورود به شکافنده باریکه قطبش‌گر به دو بخش تقسیم شده و در دو بازوی مختلف تداخل‌سنج انتشار می‌یابد.



شکل (۱): طرح چیدمان تجربی مورد استفاده

لیزر مورد استفاده در این مطالعه، لیزر هلیوم نئون با طول‌موج ۶۳۲٫۸ نانومتر، با قطبش خطی و توان ۵ میلی‌وات مدل Melles Griot 098DPP بوده است. با دوران تیغه نیم‌موج اول، جهت قطبش خطی باریکه اصلی دوران یافته و سپس دو

[۵و۴] بکار گرفته شد. آن‌ها از روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری کلاسیک (ثابت تمام‌نگاشت‌ها توسط فیلم عکاسی و بازسازی توسط باریکه لیزری) برای اندازه‌گیری دز تابشی باریکه‌ی الکترون استفاده کردند. این کار با کمی تغییر، توسط میلر و همکاران در سال ۱۹۷۵ [۶] ادامه یافت. در کار جدید برای ثبت تغییرات نوارهای تداخلی، از یک تک دیود نوری به جای صفحه حساس به نور استفاده شد. کار بعدی در زمینه دزیمتری به روش تمام‌نگاری، مجدد توسط میلر در سال ۱۹۷۹ به انجام رسید که در آن اندازه‌گیری‌های اولیه‌ی هاسمن برای دستیابی به توزیع دز پالس‌های الکترونی حاصل از چندین شتاب‌دهنده مختلف الکترونی به کار گرفته شد [۴] نیکولا و همکارانش در سال ۱۹۹۹، دزیمتری با استفاده از تداخل‌سنجی را با استفاده از یک ریزپردازنده برای بهبود تحلیل تصاویر ادامه دادند. آن‌ها نیز از یک چیدمان تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دو باریکه‌ای استفاده کردند که بر مبنای تداخل‌سنج طرح مایکلسون چیده شده بود. تمام‌نگاشت‌ها با استفاده از یک دوربین ثبت شده و از یک ریزپردازنده برای شناسایی نیم‌رخ‌ها در تصاویر و تحلیل طرح نوارهای تداخلی استفاده می‌شد. روی هم رفته، محدودیت بزرگ تحقیقات قبلی شرح داده شده، در محدودیت اطلاعاتی است که با شمارش دستی نوارهای تداخلی قابل دستیابی هستند. در سال ۲۰۱۱، آکرلی و همکارانش ایده کالریمتری نوری را به منظور دزیمتری پرتودرمانی ریز باریکه بازبینی نمودند [۶]. آن‌ها مفهوم تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال را پیشنهاد نمودند، اما با توجه به دسترسی محدودشان به تجهیزات مورد نیاز، در عمل از روشی به نام نقشه‌برداری تصویر مرجع استفاده کردند [۸و۷]. اما در سال ۲۰۱۷ با توجه به پیشرفت در فناوری دوربین‌های تصویربرداری و امکان بهره‌گیری از قدرت پردازش رایانه‌ای در تحلیل طرح‌های تداخلی ایجاد شده ناشی از جذب تابش در مواد، کاوان و همکارانش از یک سیستم تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال به

مؤلفه این باریکه توسط شکافنده باریکه قطبش گر از یکدیگر تفکیک می شوند. به این ترتیب و با دوران تیغه نیم موج اول امکان تنظیم دلخواه نسبت شدت بین دو باریکه خارج شده از باریکه شکن قطبش گر وجود خواهد داشت. بخش اول باریکه به عنوان باریکه مرجع از تیغه نیم موج دوم عبور می کند تا توسط آینه ۲ به سمت عدسی شیئی هدایت شود. باریکه مرجع پس از عبور از روزنه، پالایش و پهن شده و در نهایت از طریق باریکه شکن ترکیب به سطح حساس به نور دوربین می رسد. نقش تیغه نیم موج دوم در مسیر باریکه مرجع، دوران مجدد جهت قطبش و همسوسازی آن با جهت قطبش باریکه دوم است. باریکه دوم، پس از بازتاب سطح آینه ۳ به سمت عدسی شیئی هدایت و پس از عبور از روزنه، پالایش شده و به نمونه جاذب وارد می شود. در این کار از یک سلول مکعب مستطیل شکل از جنس کوارتز به ابعاد $12 \times 12 \times 45$ میلی متر مکعب و به ضخامت بدنه ۱ میلی متر، محتوی آب به عنوان نمونه جاذب استفاده شده است. در نهایت باریکه شیئی با باریکه مرجع روی سطح حساس به نور دوربین دیجیتال برهم نهی شده و طرح نوارهای تداخلی شکل خواهد گرفت. این تصویر توسط دوربین ثبت شده و برای رؤیت و پردازش های بعدی به رایانه منتقل می شود.

برای درک چگونگی شکل گیری طرح نوارهای تداخلی در روش تداخل سنجی تمام نگاری دیجیتال، ابتدا باید روابط فیزیکی مربوط به انتشار نور، تغییر فاز جبهه موج لیزری، و تداخل امواج را برای شرایط مورد استفاده در این روش مورد بررسی قرار داد. اگر شدت جبهه موج های شیئی و مرجع را روی سطح دوربین به ترتیب با I_1 و I_2 نشان دهیم، شدت حاصل از برهم نهی به صورت زیر خواهد بود [۹ و ۱۰]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi \quad (1)$$

تغییرات ضریب شکست ایجاد شده در ماده ناشی از جذب تابش است. معادله (۱) جمع شدت های هر یک از دو موج را بیان می کند؛ به علاوه ی بخش متغیر نوسانی که نوارهای تداخلی را ایجاد می کند. بخش تداخلی رابطه ۱ زمانی پیشینه می شود که تداخل سازنده باشد:

$$\Delta\varphi = 2m\pi \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

که m مرتبه ی نوار تداخلی است. تداخل های سازنده به ازای مقادیر مختلف m نوارهای روشن را در طرح نوارهای تداخلی ایجاد می کنند. علاوه بر این، بخش نوسانی زمانی کمینه می شود که تداخل مخرب (ویرانگر) باشد:

$$\Delta\varphi = (2m + 1)\pi \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

تداخل های ویرانگر به ازای مقادیر مختلف m ، نوارهای تاریک را در طرح نوارهای تداخلی شکل می دهند.

اختلاف فاز به دست آمده نماینده تغییر در طول مسیر نوری ΔOPL است که نور هم دوس آن را می پیماید. برای آنکه تغییرات فاز را به تغییرات طول مسیر نوری تبدیل کنیم، چون تغییرات فاز در بازه 2π اندازه گیری می شود، ابتدا آن را به 2π تقسیم کرده و سپس در طول موج نور ضرب می کنیم:

$$\Delta OPL = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \lambda \quad (4)$$

که در آن λ طول موج لیزر مورد استفاده در چیدمان تداخل سنجی (۶۳۲٫۸ نانومتر) است. از آنجا که راه نوری را می توان به صورت زیر نوشت:

$$OPL = nL \quad (5)$$

که n ضریب شکست محیط و L طول فیزیکی آن است. بنابراین:

$$(\Delta n)L = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \lambda \quad (6)$$

که $\Delta n = n_2 - n_1$ ، اختلاف ضریب شکست بین دو حالت شیئی است. n_1 ضریب شکست اولیه و n_2 ضریب شکست نهایی، یعنی پس از تغییر در دمای جسم است. برای مرتبط



شکل (۳): یک نمونه از طرح نوارهای تداخلی ثبت شده توسط

چیدمان تجربی برای نمونه جاذب آب.

برای گرمادهی به نمونه، از یک لیزر مادون قرمز ۹۸۰ نانومتر موج پیوسته با توان ۲۰۰ میلی‌وات استفاده شده است. همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده است گرمادهی به نمونه به صورت عمود بر مسیر باریکه لیزری هلیوم-نئون و از بالای نمونه به انجام رسیده است. برای اندازه‌گیری هم‌زمان دما، از یک دماسنج با دقت ۰٫۱ درجه سلسیوس مدل SAMWON استفاده شده است. در شروع آزمایش‌ها، ابتدا دمای اولیه آب توسط دماسنج اندازه‌گیری شده است. پس از ۲ دقیقه، لیزر مادون‌قرمز مستقر در بالای سلول آب روشن شده و تابش‌دهی آغاز شده است. تابش‌دهی با لیزر به مدت دو دقیقه و ۳۰ ثانیه به انجام رسیده و پس از آن لیزر مادون قرمز خاموش شده است. به نمونه جاذب اجازه داده شده است که به تدریج سرد شده تا به دمای محیط برسد. در طول مدت سرد شدن، کلیه طرح نوارهای تداخلی توسط رایانه ثبت و تحلیل شده‌اند. کل مدت زمان آزمایش ۵ دقیقه بوده است. برای محاسبه تغییرات دمایی، از رابطه (۸) استفاده شده است.

۳. نتایج

تغییرات شدت میانگین یک ناحیه ۳×۳ از پیکسل‌های دوربین با گذشت زمان و سرد شدن تدریجی سیستم در شکل ۴ نشان داده شده است. برای ردیابی جابجایی طرح تداخلی ایجاد شده از الگوریتم هوشمند نوشته شده در محیط نرم‌افزار برنامه MATLAB استفاده شده است. در این الگوریتم برای

کردن تغییرات ضریب شکست به تغییرات دمایی، با مراجعه به مستندات علمی و از روابط تجربی نشان‌دهنده وابستگی دمایی ضریب شکست محیط خاص به دما استفاده می‌شود:

$$\Delta n = \frac{dn}{dT} \Delta T \quad (7)$$

که در آن dn/dT ، ضریب گرما-نوری شیئی است. در نهایت با ترکیب روابط (۶) و (۷)، مقدار ΔT از رابطه زیر بدست خواهد آمد:

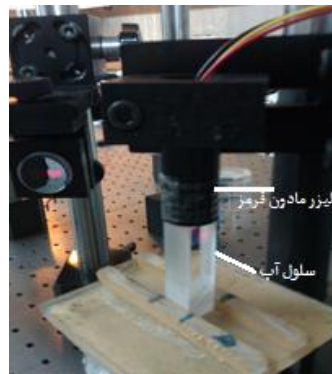
$$\Delta T = \frac{\Delta m \lambda}{L \frac{dn}{dT}} \quad (8)$$

که در آن Δm تعداد نوارهای تداخلی جابه‌جا شده بر اثر اعمال گرما به نمونه جاذب است.

با ضرب نمودن مقدار تغییرات دمای به دست آمده از رابطه ۸ در عدد ظرفیت گرمایی ویژه c_p ماده جاذب، مقدار دز جذبی حاصل از تخلیه انرژی باریکه لیزر مادون قرمز در داخل ماده جاذب بدست می‌آید:

$$D = c_p \Delta T \quad (9)$$

طرحی از هندسه قرارگیری لیزر مادون قرمز در بالای سلول آب در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل (۲): هندسه نشان‌دهنده تابش‌دهی سلول آب با پرتوی غیر

یونساز لیزری.

نمایی از طرح نوارهای تداخلی ثبت شده توسط چیدمان شکل ۱ در شکل ۳ نشان داده شده است.

۱.۳ اثر گرمای القایی لیزر مورد استفاده در تداخل سنج

همانطور که در بخش‌های قبلی اشاره شد، از لیزر مادون قرمز برای گرمایش سلول کوارتز محتوی آب و از لیزر هلیوم-نئون در قالب یک تداخل سنج، برای پایش میزان انرژی جذب شده توسط لیزر مادون قرمز در درون محیط استفاده شده است. لیزرهای با کیفیت بالا و توان کم، مانند لیزرهای هلیوم-نئون ۱ تا ۱۰ میلی وات، به طور گسترده در تداخل سنجی تمام نگاری دیجیتال استفاده می‌شوند. به منظور ایجاد اثر گرمایش القا شده توسط لیزر هر چند به صورت بسیار جزئی، باریکه لیزر به اندازه ای پهن می‌شود که بتواند تمام سطح ورودی سلول را پوشش دهد. در این بخش، اثر گرمایش القایی ایجاد شده توسط لیزر هلیوم-نئون مورد استفاده در تداخل سنج، با مدل سازی فرآیند انتقال حرارت در داخل سلول آب به روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفته است. معادله انتقال حرارت در شرایط ثابت برای یک موج نوری تخت ساده منتشره در راستای محور Z می‌تواند به صورت زیر نوشته شود [۱۲]:

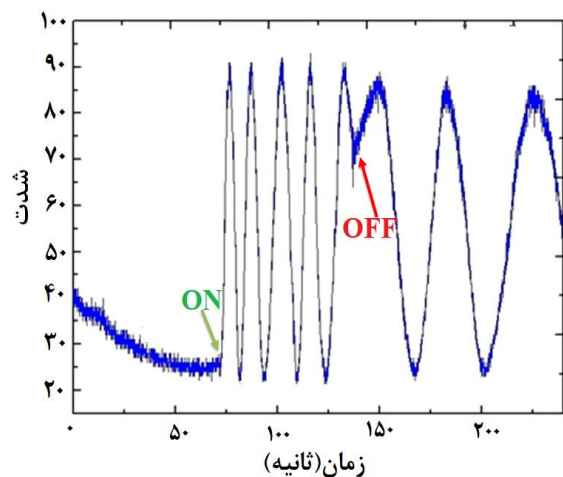
$$-k\nabla^2(x, y, z) = Q \quad (10)$$

که در آن Q، تابع چشمه گرمایی است:

$$Q = \frac{2P\alpha}{b^2} \exp(-\alpha z) \quad (11)$$

α برابر با $\frac{1}{m}$ ، ۰.۲۹۹۵ و k برابر با $\frac{w}{mK}$ ، ۰.۵۹۱ به ترتیب ضریب جذب نوری و رسانش گرمایی آب هستند. p توان لیزر و b با مقدار ۱.۲ سانتیمتر نشان دهنده طول لبه وجه مربعی در سطح ورودی سلول است. در اینجا اثر عدم قطعیت ناشی از لیزرهای ۱ تا ۱۰ میلی‌واتی هلیوم-نئون بر مقدار دز جذبی در نظر گرفته شده است. دمای القا شده در داخل سلول (ΔT_{laser}) با استفاده از رابطه ۸ حساب می‌شود. برای حل معادله انتقال حرارت، شرایط مرزی سلول در شکل ۲ فرض شده است که در دمای محیط ثابت قرار دارد. به منظور سهم دادن تابش لیزر

حذف نوفه‌ها، ابتدا طرح نوارهای تداخلی با اعمال پیاپی دوبار صافی میانه و دوبار صافی میانگین، هر دو با ابعاد 3×3 ، پالایش شده است [۱۱]. سپس موقعیت و شدت بیشینه و کمینه‌های متوالی در شکل‌هایی نظیر شکل ۴ تعیین و ثبت شده است. برای به دست آوردن مقدار Δm تعداد کمینه‌های عبوری از روی موقعیت ناحیه 3×3 در نظر گرفته شده برای محاسبه مقادیر میانگین، شمارش شده است. دمای اولیه آب مقطر مورد استفاده ۲۲.۵ درجه سلسیوس بوده است. دمای نهایی سلول آب پس از خاموش نمودن لیزر مادون قرمز، با استفاده از دماسنج اندازه‌گیری شده است تا با مقدار به دست آمده از رابطه (۸) مقایسه شود. آزمایش‌ها ده مرتبه تکرار شده‌اند تا مقادیر دقیق تغییرات دمایی قابل استخراج باشند.



شکل (۴): نمودار تغییرات شدت بر حسب زمان برای نمونه آب تحت تابش لیزر مادون قرمز.

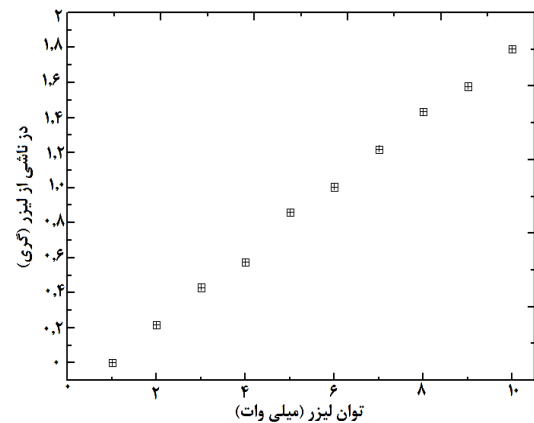
مقدار Δm طبق نمودار به دست آمده حدود ۴.۵ است. میزان تغییرات دز جذبی D به علت تابش، با استفاده از رابطه (۸) مقدار 0.41 ± 0.02 کیلوگری به دست آمده است. مقدار تغییر دز با استفاده از دماسنج دیجیتال قرار داده شده در داخل سلول آب نیز حدود 0.4 ± 0.02 کیلوگری اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان‌دهنده همخوانی مطلوب بین نتایج حاصل از چیدمان تمام‌نگاری دیجیتال با نتایج بدست آمده از دماسنج است.

موقعیت نمونه برابر با ۲ میلی‌وات بود. با توجه به شکل ۲، به ازای این مقدار توان لیزری، میزان خطا در برآورد میزان دز جذبی حدود ۰,۲ گری است.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده در این کار نشان‌دهنده آن است که سیستم تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال می‌تواند ابزار مناسبی برای اندازه‌گیری غیرتماسی و غیرمخرب میزان انرژی جذب شده در مایعات بر اثر جذب پرتوهای غیر یون‌ساز لیزری باشد. برخلاف دماسنج‌های دیجیتال معمولی که برای کالریمتری مورد استفاده قرار گرفته و حسگر آن‌ها باید در تماس مستقیم با ماده باشد، غیرتماسی بودن روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال از ایجاد پراکنش و تداخل در میدان تابشی فرودی بر ماده جاذب ممانعت به عمل می‌آورد. علاوه بر این، دماسنج‌های معمول توزیع میدان دمایی در درون ماده جاذب را تحت تأثیر قرار داده و اندازه‌گیری میزان انرژی جذب شده را با خطا مواجه می‌سازند. با استفاده از روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال، امکان سنجش میزان تغییرات دمایی به طور پیوسته و هم‌زمان با تابش‌دهی به نمونه وجود خواهد داشت.

در مقدار دز جذبی، ΔT_{laser} به دز جذبی مطلق از طریق ضرب آن در ظرفیت گرمایی ماده جاذب تبدیل شده است.



شکل (۵): معادل دز جذبی میانگین ناشی از باریکه لیزر دستگاه تداخل‌سنجی به ازای توان لیزر.

شکل ۵ دز جذبی معادل تابش لیزر هلیوم-نئون را نسبت به توان لیزر نشان می‌دهد. دز جذبی در بازه ۰,۰۰ تا ۱,۸۰ گری برای لیزرهایی در بازه توانی ۱ تا ۱۰ میلی‌وات بدست آمده است. برای برآورد میزان خطا در اندازه‌گیری دز جذبی تابش غیر یون‌ساز لیزر مادون قرمز در داخل سلول آب، شکل ۲، بر اثر جذب ناخواسته تابش لیزر هلیوم-نئون مورد استفاده در تداخل‌سنجی، شکل ۱، با استفاده از توان‌سنج لیزری، توان لیزری در چیدمان تجربی و در محل نمونه، شکل ۱، اندازه‌گیری شد. توان اندازه‌گیری برای باریکه لیزری در

۵. مراجع

- [1] J. W. Goodman, R. W. Lawrence. Digital image formation from electronically detected holograms. *Appl. Phys. Lett.* 11.3 (1967) 77-79.
- [2] E. K. Hussman. A holographic interferometer for measuring radiation energy deposition profiles in transparent liquids. *Appl. Opt.* 10(1971)182-186.
- [3] E. K. Hussmann, W. L. McLaughlin. Dose-distribution measurement of high-intensity pulsed radiation by means of holographic interferometry. *Radiat. Res.* 47.1 (1971)1-14.
- [4] A. Miller. Holography and interferometry in dosimetry. *Nukleonika* 24.9 (1979) 907-925.
- [5] A. Miller, E. K. Hussmann, W. L. McLaughlin. Interferometer for measuring fast changes of refractive index and temperature in transparent liquids. *Rev. Sci. Instrum.* 46(1975) 1635-1638
- [6] T. Ackerly, J. C. Crosbie, A. Fouras, G. J. Sheard, S. Higgins, R. A. Lewis. High resolution optical calorimetry for synchrotron microbeam radiation therapy. *J. Instrum.* 03 (2011) 03003.
- [7] A. Fouras, K. Hourigan, M. Kawahashi, H. Hirahara. An improved, free surface, topographic technique. *J. Visual.* 9(2006) 49-56.
- [8] A. Fouras D. L. Jacono G. J. Sheard K. Hourigan. Measurement of instantaneous velocity and surface topography in the wake of a cylinder at low Reynolds number. *J. Fluid. Struct.* 8 (2008) 1271-1277.
- [۹] بیگ زاده، امیرمحمد. رشیدیان وزیری، محمدرضا. ضیائی، فرهود. به کارگیری روش تداخل سنجی تمام نگاری دیجیتال با نوردهی دوگانه برای محاسبه میزان دز جذبی در پلیمر پلی متیل متاآکریلات. *مجله سنجش و ایمنی پرتو*، جلد ۵، شماره ۴، (۱۳۹۶) ۵۱-۶۱.
- [10] A. M. Beigzadeh, M. R. Rashidian Vaziri, F. Ziaie. Modelling of a holographic interferometry based calorimeter for radiation dosimetry. *Nucl. Instrum. Meth. A.* 864 (2017) 40-49.
- [11] R. C. Gonzalez, E. W. Richard, S. L. Eddins. *Digital image processing using MATLAB.* Upper Saddle River, New Jersey: Pearson-Prentice-Hall, (2004).
- [12] M. R. Rashidian Vaziri, F. Hajiesmaeilbaigi, M. H. Maleki. New raster-scanned CO₂ laser heater for pulsed laser deposition applications: design and modeling for homogenous substrate heating. *Opt. Eng.* 51.4 (2012) 044301.

