

اندازه‌گیری دز جذبی الکترون در فانتوم آب به روش تمام‌نگاری دیجیتال با باریکه لیزر

محمد رضا رشیدیان وزیری^{۱*}، امیرمحمد بیگزاده^۲، فرهود ضیایی^۳

۱- استادیار، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی

۲- دانشجوی دکتری، ۳- استاد، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

(دریافت: ۹۶/۰۸/۲۳، پذیرش: ۹۶/۱۲/۱۶)

چکیده

پرتوهای پرنرژی الکترونی، از جمله پرتوهای یون‌سازی هستند که کاربرد فراوانی در پزشکی هسته‌ای و برای درمان تومورهای سرطانی دارند. با این وجود، این پرتوها در طی مسیر خود در بدن بیمار می‌توانند به سلول‌های سالم نیز آسیب وارد نمایند. بنابراین، آگاهی از نحوه توزیع دز جذبی در فانتومی معادل با بافت بدن، نیاز اصلی طراحی درمان با استفاده از پرتوهای الکترونی است. در سالیان اخیر استفاده از روش تمام‌نگاری دیجیتال برای اندازه‌گیری و پایش دقیق و سه‌بعدی دز جذبی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این کار، طراحی و مدل‌سازی یک ابزار دزیمتری متحرک با استفاده از روش تمام‌نگاری دیجیتال به انجام رسیده و روش جدیدی برای اندازه‌گیری دز جذبی الکترون به روش تمام‌نگاری دیجیتال با باریکه لیزر ارائه شده است. روش ارائه شده برای اندازه‌گیری دز جذبی به‌گونه‌ای توسعه یافته است که در مقابل نوفه‌های محیطی حاصل از به کارگیری آن در شرایط سخت ایمن باشد. مدل‌سازی مونت کارلو و عددی ابزار طراحی شده، بیانگر قابلیت بالای آن در اندازه‌گیری دقیق دز جذبی است.

کلید واژه‌ها: اپتیک، دزیمتری، تمام‌نگاری، تداخل‌سنجی

Measuring the Absorbed Dose of Electron Radiation in Water Phantom Using Digital Holography Technique with a Laser Beam

M. R. Rashidian Vaziri^{*}, A. M. Beygzadeh, F. Ziaei

Nuclear Science & Technology Research Institute

(Received: 14/11/2017; Accepted: 07/03/2018)

Abstract

High energy electron beams are one of those ionizing radiation beams that are being widely used in nuclear medicine for treatment of cancerous tumors. However, these beams may also harm the healthy cells in traversing the patient body. Accordingly, knowing the dose distribution in a tissue-equivalent phantom is the main requirement in an electron therapy treatment design. In recent years, great interest is attracted toward the application of digital holography method for accurate three dimensional measurement and monitoring of the absorbed dose. In this work, design and modelling of a mobile dosimetric instrument, which works based on the digital holography principles, are studied and a new approach is developed for measuring the absorbed dose of electron radiation using the digital holography technique with a laser beam. The proposed method for measuring the absorbed dose is also developed to be immune against the environmental noises that are present in difficult situations. Monte Carlo and numerical modelling of the instrument, demonstrate its capability in accurate measurement of the absorbed dose.

Keywords: Optics, Dosimetry, Holography, Interferometry

۱. مقدمه

پس از آگاهی و درک دانشمندان از وجود تابش‌های هسته‌ای، استفاده از آن‌ها در زمینه‌های کاربردی مختلف نیز گسترش یافته است. امروزه تابش‌های هسته‌ای در زمینه‌های درمان، تحقیقات علمی و صنعتی و به‌ویژه در تولید برق کاربرد فراوانی دارند. علاوه بر این، تابش‌های هسته‌ای کاربردهای سودمندی در زمینه‌های کشاورزی، باستان‌شناسی، اکتشافات فضایی، تعیین جرم، معدن-شناسی و بسیاری زمینه‌های دیگر دارند [۱].

پرتوهای پراثرژی الکترونی، از جمله پرتوهای یون‌سازی هستند که کاربرد فراوانی در پزشکی هسته‌ای و برای درمان تومورهای سرطانی دارند. هرچند برخی از انواع سرطان را می‌توان با جراحی بیمار درمان کرد، اما گزینه‌های جایگزین و با آسیب کمتر، نظیر حذف تومورهای سرطانی بیمار از طریق پرتودرمانی نیز روز به روز حال گسترش هستند. پرتوهای الکترونی قادر به تحویل انرژی خود در یک فاصله مشخص بوده و با یون‌سازی در طول مسیر باعث بروز آسیب‌های کشنده در سلول‌های سرطانی بدخیم می‌شوند. در هر حال نباید از نظر دور داشت که هیچ نوع تابشی نمی‌تواند سلول‌ها را از لحاظ بدخیم یا خوش‌خیم بودن تفکیک کند. از این رو تابش ممکن است در طول مسیر خود تخریب و یا نابودی سلول‌های سالم را نیز به همراه داشته باشد. بنابراین آگاهی از نحوه توزیع دز جذبی در بافت نیاز اصلی طراحی درمان با استفاده از پرتوهای یون‌ساز الکترونی است [۲].

برای اندازه‌گیری دز جذبی می‌توان از ابزارهایی نظیر اتاقک‌های یونش، فیلم‌های بچ^۱، کالریمترها یا سایر ابزارآلات مناسب دیگر استفاده کرد [۳]. به طور خاص، معادل بافت نبودن ماده‌ای که آشکارساز از آن ساخته شده است منجر به اغتشاش شار باریکه یونیزان تابشی در ابزارهای دزیمتری می‌شود. این مشکل، به‌کارگیری ضرایب تصحیحی برای تعیین مقدار دز جذبی صحیح را الزامی می‌سازد. ایراد دیگر روش‌های دزیمتری معمول، دقت تفکیک محدود فضایی و زمانی آن‌هاست. به‌عنوان مثال در کالریمترهایی که به عنوان دزیمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند، اطلاعات گرمایی در مجاورت سطح یک مقاومت گرمایی کوچک تعبیه شده در قلب اصلی دزیمتر به کل میزان انرژی جذب‌شده در ماده اختصاص داده شده و به عنوان دز کل جذب‌شده در ماده (دز مطلق) در نظر گرفته می‌شود. این روش اندازه‌گیری میزان دز جذبی مطلق، برای میدان‌های پرتوی کوچک و برای اندازه‌گیری

در ناحیه‌هایی با شیب بالای دز دقیق نیست [۴]. مشکل دیگر این ابزارها، یکسان نبودن ماده‌ای که ترمیستور از آن ساخته شده با ماده اصلی دزیمتر است که به سبب ظرفیت گرمایی متفاوت، عامل ایجاد گرادیان دمایی بین آن‌ها می‌شود. وجود این نوع از گرادیان دمایی، محاسبات میزان دز را با خطا روبرو می‌سازد [۵]. نکته دیگر، استخراج اطلاعات سه‌بعدی دز در داخل ماده است که با استفاده از دزیمترهای معمول و معرفی شده، این امر غیرممکن و یا در صورت امکان بسیار دشوار است.

ذات سه‌بعدی و پیچیده توزیع دز، این نیاز را ایجاد می‌کند که روش‌های کمی و دقیق‌تری که برای اندازه‌گیری سه‌بعدی شناخته شده هستند، نظیر روش تمام‌نگاری، مورد استفاده قرار گیرند [۶]. در این روش، اساس اندازه‌گیری بر مبنای سنجش تغییر فاز جبهه نور عبوری از جسم تحت بررسی و مقایسه آن با فاز ابتدایی جبهه موج قبل از شروع اندازه‌گیری است. کمیت مورد اندازه‌گیری می‌تواند نیرو، تنش، کرنش، تغییرات دمایی، دامنه ارتعاش و یا میزان انرژی جذب‌شده از ذرات خارج‌شده از یک منبع رادیواکتیو باشد [۷]. منبع نوری نیز می‌تواند هرگونه منبع نوری همدوس، بخصوص منبع نوری پرشدت و با همدوسی بالای لیزری باشد. کاربرد این روش برای دزیمتری اولین بار در سال ۱۹۷۱ و برای اندازه‌گیری دز جذبی در مایعات شفاف بود [۷]. از آنجا که در این نوع دزیمتر، ماده تشکیل‌دهنده آشکارساز و فانتوم یکسان هستند، از این رو این روش به طور آرمانی همگن است. قرائت‌گر دز جذبی در این روش یک باریکه همدوس لیزری است که از داخل فانتوم عبور می‌کند. از آنجا که ضریب شکست مواد به دما وابسته است [۸]، فاز باریکه لیزری با توجه به افزایش دمای ناشی از تابش ذرات، تغییر خواهد کرد. تغییر فاز به صورت یک طرح نوار تداخلی یا تمام‌نگار، با استفاده از چیدمان تداخل‌سنجی مناسب ثبت و پس از بازسازی، تبدیل به دز جذبی در ماده فانتوم می‌شود. در بسیاری از مطالعات مذکور، پاسخ این نوع از کالریمترها روی فیلم حساس به نور ثبت شده است (روش تمام‌نگاری کلاسیک) که فرآیندی دشوار بوده و نیاز به زمان نوردهی زیادی برای ثبت تمام‌نگار و پس از آن مراحل پردازش شیمیایی برای ظهور آن دارد. وجود این مشکلات، استفاده از این روش برای کاربردهای عملی که در آن به دزیمتری سریع و دقیق نیاز است را بسیار دشوار می‌ساخت.

پیشرفت‌های قابل توجه در فن‌آوری دوربین‌های دیجیتالی و همچنین افزایش چشمگیر قدرت پردازش رایانه‌ها، امکان ثبت

¹ Badge Films

مطلق از طرح نوارهای تداخلی به طور کامل شرح داده شده است. امکان استفاده از روش ارائه شده برای تعیین دز جذبی ناشی از سایر تابش‌های یونیزان در انرژی‌های مختلف نیز میسر است. برخط، سریع و دقیق بودن روش ارائه شده، امکان به کارگیری آن در دزیمتری و پایش محیطی میزان انرژی جذبی را فراهم می‌سازد.

۲. مدل‌سازی فرایند دزیمتری با استفاده از روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال

شکل (۱) یک نمونه ساده و قابل حمل از دزیمتر بر پایه تمام‌نگاری دیجیتال را برای پایش میزان دز جذبی نشان می‌دهد. در دزیمتری با استفاده از روش تمام‌نگاری دیجیتال، از فانتومی شفاف معادل با بافت بدن انسان، در چیدمان تداخل‌سنجی استفاده می‌شود (شکل ۱). آب در بسیاری از محاسبات رادیوبیولوژیکی به عنوان ماده‌ای معادل با بافت بدن در نظر گرفته می‌شود [۱۶]؛ لذا میزان دز جذب شده در آب با میزان دز سپارش شده توسط تابش در بدن انسان معادل در نظر گرفته می‌شود.

باریکه خروجی لیزر پس از عبور از یک مجموعه عدسی تلسکوپی باز شده و پس از عبور از تیغه نیم‌موج^۱ وارد باریکه شکن قطبش‌گر^۲ می‌شود. بخشی از باریکه لیزری شکل گرفته پس از بازتاب از سطح یک آینه تخت، وارد فانتوم تحت تابش یونیزان شده و سپس به باریکه‌شکن ترکیب^۳ می‌رسد (باریکه شیئی). بخش دوم باریکه نیز پس از عبور از تیغه نیم‌موج دوم و بازتاب از سطح یک آینه تخت به باریکه‌شکن ترکیب می‌رسد (باریکه مرجع). دو باریکه در باریکه‌شکن ترکیب بر یکدیگر برهم‌نهی شده و طرح تداخلی حاصل از آن، یا همان تمام‌نگار، به سطح حساس به نور دوربین دیجیتال رسیده و توسط آن ثبت می‌شود. در کنار باریکه شکن ترکیب می‌توان از دو روزنه برای تنظیم دقیق‌تر ارتفاع باریکه‌های مرجع و شیئی بهره برد. با استفاده از دو تیغه نیم‌موج و باریکه‌شکن قطبش‌گر می‌توان نسبت بین شدت دو باریکه مرجع و شیئی را با دقت و برای رسیدن به بهترین نمایانی طرح نوارهای تداخلی تنظیم کرد. کل چیدمان نوری بر روی یک میز نوری کوچک سوار شده و مجموعه در داخل یک جعبه فلزی قابل حمل قرار می‌گیرد.

فوری تمام‌نگار با دوربین‌های دیجیتال و پردازش سریع آن‌ها را در رایانه را فراهم آورد. این روش، که به عنوان تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال شناخته شده است، برای اولین بار در سال ۱۹۹۴ پیشنهاد شد و در حال حاضر به طور گسترده‌ای برای اندازه‌گیری‌های دقیق نوری استفاده می‌شود [۹]. در سال ۲۰۱۴، این روش برای کالریمتری تابش و پایش محیطی یک چشمه براکی‌تراپی دز بالا [۱۰] با موفقیت استفاده شد. مزیت اصلی استفاده از روش دیجیتال نسبت به روش‌های کلاسیک، سهولت در جمع‌آوری داده‌ها، بازسازی و تجزیه و تحلیل داده‌ها است [۱۰]. در سالیان اخیر، کاربرد کالریمتری بر اساس روش تداخل‌سنجی، با هدف به حداقل رساندن نوسانات دمایی محیط و دیگر نوفه‌های محیطی و به منظور افزایش تفکیک اندازه‌گیری دز در مجاورت شتاب‌دهنده‌های ذرات گزارش شده است [۱۱]. در مطالعات ذکر شده، از روش‌های مختلفی برای بازیابی توزیع دز جذبی در ماده فانتوم استفاده شده است. به عنوان مثال، روش‌های تشخیص و شماره‌گذاری نوار تداخلی [۱۲]، تشخیص نوار تداخلی و استفاده از تبدیل ابل معکوس [۷ و ۱۳] تبدیل فرنل و واپیچش فاز [۱۰] و اندازه‌گیری مستقیم جابجایی فاز در یک نقطه [۱۱] تاکنون مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در این مقاله، طراحی ابزار دزیمتری قابل حمل و روشی جدید، ساده و در عین حال دقیق برای اندازه‌گیری دز جذبی مطلق با استفاده از روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال ارائه شده است. مبنای این روش اندازه‌گیری بر پایه مدلی است که پیش‌تر از این توسط گروه نویسندگان مقاله ارائه شده است [۱۴]. روش جدید معرفی شده در این مطالعه بر اساس تشخیص خودکار نوارهای تداخلی و شمارش آن‌ها، بررسی شدت نوارها و استفاده از معادلات محاسباتی کالیبراسیون است. به منظور اثبات قابلیت این روش در اندازه‌گیری دقیق کل دز مطلق جذبی، فرایند دزیمتری در آزمایش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال به طور محاسباتی مدل‌سازی شده است. به این منظور، ابتدا توزیع دز جذب شده از یک چشمه الکترونی در فانتوم آب با استفاده از کد محاسباتی MCNPX [۱۵] به روش مونت کارلو محاسبه شده است. روابط فیزیکی مورد نیاز برای تبدیل توزیع دز جذبی محاسبه شده به الگوی نوارهای تداخلی، به دست آمده و ارائه شده‌اند. یک الگوریتم چند بخشی در محیط MATLAB برای تبدیل دز محاسبه شده با کد MCNPX به طرح نوارهای تداخلی، بر اساس روابط فیزیکی استخراج شده نوشته شده است. روش ارائه شده برای اندازه‌گیری، یا به بیان دقیق‌تر بازیابی، دز جذبی

^۱ Half Wave Plate

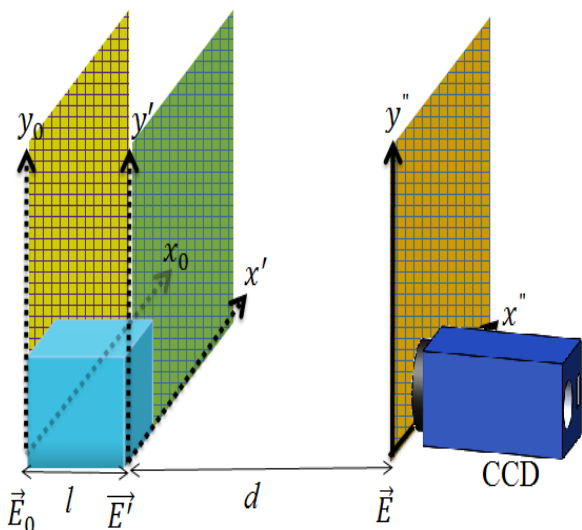
^۲ Polarizing Beam Splitter

^۳ Combining Beam Splitter

با استفاده از این توزیع دز سه بعدی محاسبه شده، امکان بررسی دقیق روشی که در ادامه برای بازیابی دز جذبی کل شرح خواهیم داد وجود خواهد داشت. پس از محاسبه دز جذبی در فانتوم، تمام نگار دیجیتال به صورت محاسباتی و با استفاده از روش ساخت تمام نگارهای رایانه‌ای تولید می‌شود. به این منظور، فرض کنید که فانتوم بین صفحات (x_0, y_0) و (x', y') در مختصات دکارتی بوده و سطح حساس به نور دوربین نیز در صفحه (x'', y'') واقع شده باشد (شکل ۳). اگر فرض کنیم که باریکه لیزر دارای جبهه موج تختی با راستای انتشار در امتداد محور z باشد:

$$E_0 = A_0 e^{ik_0 z} \quad (1)$$

که در آن، A_0 دامنه و $k = 2\pi/\lambda$ عدد موج هستند، این باریکه لیزر از داخل فانتومی به ضخامت L عبور کرده و به صورت میدان E' از آن خارج خواهد شد. تابش جذب شده در ماده فانتوم باعث شکل‌گیری تغییر فاز ϕ بین میدان‌های E_0 و E' می‌شود:



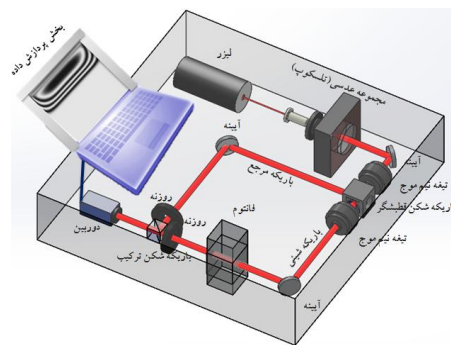
شکل ۳. طرح هندسه مورد استفاده برای مدل‌سازی انتشار باریکه لیزری در بازوی شیئی چیدمان تداخل‌سنجی.

(میدان ورودی به فانتوم با \vec{E}_0 ، میدان خروجی از آن با \vec{E}' ، و میدان شیئی تابشی به سطح دوربین CCD با \vec{E}'' مشخص شده‌اند. طول فانتوم برابر با l و فاصله بین سطح خروجی فانتوم تا سطح حساس به نور دوربین برابر با d است)

$$\phi(x', y') = k_0 \int_0^l \Delta n(x', y', z) dz \quad (2)$$

که در آن Δn تغییر ضریب شکست به علت افزایش دمای حاصل از جذب تابش در درون ماده است:

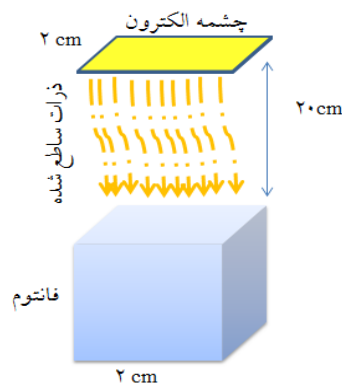
$$\Delta n(x, y, z) = \frac{dn}{dT} \Delta T(x, y, z) = \frac{1}{c} \frac{dn}{dT} D(x, y, z) \quad (3)$$



شکل ۱. طرح‌واره‌ای از یک دزیتر قابل حمل طراحی شده بر پایه تمام‌نگاری دیجیتال.

افزایش دمای ناشی از جذب تابش یونیزان، فاز باریکه لیزر عبوری از داخل فانتوم را تغییر می‌دهد. برهم‌نهی این باریکه، باریکه شیئی، با بخش دیگر باریکه لیزری اصلی، باریکه مرجع، به شکل تمام‌نگار بر روی سطح حساس به نور دوربین دیجیتال شکل می‌گیرد. تمام‌نگار دیجیتال ثبت شده برای پردازش‌های بعدی به رایانه قابل حمل متصل به دستگاه منتقل می‌شود. تمام‌نگار دیجیتال دیگری نیز در غیاب منبع تابش یونیزان، با استفاده از همین چیدمان ثبت می‌شود. با استفاده از دو تمام‌نگار دیجیتال ثبت شده، تغییر فاز ناشی از تابش یونیزان می‌تواند بازیابی شود. تغییر فاز را می‌توان با استفاده از تبدیل فرنل جمع دو تمام‌نگار [۱۷] و با از طریق تبدیل فرنل جداگانه هر کدام از آن‌ها و تفریق فازهای مربوطه از یکدیگر [۱۰] بازیابی کرد.

به منظور مدل‌سازی فرایند اندازه‌گیری که ذکر شد، ابتدا دز جذبی در ماده فانتوم آب به طور محاسباتی و با استفاده از کد مونت‌کارلوی MCNPX به دست آمده است. در این مدل‌سازی از یک چشمه الکترونی صفحه‌ای به شکل مربع و به ضلع ۲ سانتی‌متر استفاده شده است. این چشمه به صورت یکسو و از فاصله ۲۰ سانتی‌متری از سطح بالایی فانتوم به آن می‌تابد. در شکل (۲) طرح هندسه تابش پرتو یونیزان روی فانتوم نشان داده شده است. استفاده از چشمه الکترونی امکان مقایسه نتایج مدل با کارهای تجربی انجام شده پیشین را میسر می‌سازد.



شکل ۲. طرح هندسه منبع تابش یونیزان و فانتوم

مزایا، معایب و خصوصیات قابل استنباط از طرح نوارهای تداخلی شکل گرفته در این روش نیز در این مرجع ارائه شده‌اند.

۳. نتایج و بحث

در این کار از کد مونت کارلوی MCNPX برای محاسبه توزیع دز در داخل فانتوم آب استفاده شده است. فانتوم آب استفاده شده در این کار به شکل مکعبی $(2 \times 2 \times 2)$ سانتی‌متر مکعب بوده و فرض شده است تحت تابش باریکه الکترونی با انرژی در بازه $0.15-3.5$ مگا الکترون‌ولت قرار گرفته است (شکل ۲ را ببینید). همان‌طور که پیشتر نیز به آن اشاره شد، استفاده از منبع تابشی الکترونی با بازه انرژی ذکر شده، امکان مقایسه نتایج مدل‌سازی انجام شده با نتایج تجربی موجود و ارائه شده توسط گروه‌های دیگر را مهیا خواهد ساخت [۷، ۱۲، ۱۳، ۱۹].

محاسبات در فاصله ثابت چشمه تا فانتوم برابر با ۲۰ سانتی‌متر انجام پذیرفته است. دز کل تابشی به فانتوم در محاسبات مونت کارلو از 0.1 تا 5 کیلوگری با گام‌های 0.1 کیلوگری تغییر داده شده است. ضریب شکست در دمای اتاق n_0 ضریب نور-گرمایی dn/dT و ظرفیت گرمایی ویژه آب به صورت مستقل از دما فرض شده و به ترتیب مقادیر 1.3317 ، $\frac{1}{\text{C}} \times 10^{-5} \times 9.3 \times 10^{-5}$ [۲۰] و 4181 ژول بر کیلوگرم بر درجه کلونین [۲۱] به آن‌ها اختصاص داده شده است. فرض شده است که دزیمتر سیار (شکل ۱)، با یک لیزر هلیوم-نئون در طول موج تابشی 632.8 نانومتر روشن شده باشد.

شکل (۴) تعدادی از طرح نواحی هم‌دز محاسبه شده توسط کد MCNPX را نشان می‌دهد. دز جذبی کل در فانتوم از سمت راست به چپ به ترتیب برابر با 0.5 ، 1 و 1.5 کیلوگری بوده است. طرح نواحی هم‌دز، از سطر بالا به پایین، به ترتیب برای الکترون‌های با انرژی 1 ، 2 و 3 مگاالکترون‌ولت به دست آمده‌اند.

در شکل (۵)، نیز تعدادی از طرح نوارهای تداخلی نشان داده شده است که با استفاده از روش شرح داده شده در بخش ۲ به دست آمده‌اند.

همان‌طور که پیش از این نیز به آن اشاره شده است، نوارهای تداخلی روشن در این طرح‌های نواری تداخلی تطابق نزدیکی با نواحی هم‌دز در توزیع دز جذبی متناظر در داخل ماده فانتوم دارند [۱۴]. علاوه بر این، موقعیت آخرین نوار تداخلی تاریک، برد ذرات تابشی را مشخص می‌کند. بررسی شکل (۵) نشان می‌دهد که مطابق با انتظار، برد الکترون‌ها به انرژی آن‌ها و نه به دز جذبی کل در ماده فانتوم بستگی دارد [۲۳ - ۲۲].

dn/dT و c به ترتیب ضریب گرمایی-نوری^۱ و ظرفیت گرمایی ویژه ماده فانتوم هستند [۱۸]. x و y و z نیز نشان‌دهنده مختصات دکارتی در داخل ماده فانتوم هستند. $D(x,y,z)$ نشان‌دهنده توزیع دز جذبی سه‌بعدی در داخل فانتوم بوده که در مرحله قبل با استفاده از کد MCNPX محاسبه شده است. تغییر فاز القایی با ترکیب معادلات (۲) و (۳)، و با محاسبه انتگرال زیر به دست می‌آید:

$$\phi(x', y') = \frac{k_0}{c} \frac{dn}{dT} \int_0^l D(x', y', z) dz \quad (4)$$

بنابراین، اختلاف فاز به طور مستقیم با دز جذبی مجموع در امتداد جهت انتشار باریکه لیزر در ماده فانتوم متناسب است. با استفاده از این اختلاف فاز، میدان الکتریکی مختلط باریکه لیزر خروجی از فانتوم را می‌توان به صورت ذیل نوشت:

$$E'(x', y') = A e^{i[k_0 n_0 l + \phi(x', y')]} \quad (5)$$

که در آن، n_0 ضریب شکست ماده فانتوم در دمای اتاق است. انتشار باریکه بین صفحات (x', y') و (x'', y'') را می‌توان با استفاده تبدیل انتگرالی فرنل توصیف کرد:

$$E(x'', y'') = -\frac{ik}{d} e^{ikd} e^{\frac{ik}{2d}(x''^2 + y''^2)} \times \iint dx' dy' E'(x', y') e^{\frac{ik}{2d}(x'^2 + y'^2)} e^{-\frac{ik}{d}(x'x'' + y'y'')} \quad (6)$$

تمام‌نگار دیجیتالی با برهم‌نهی میدان محاسبه شده از رابطه (۶) با یک موج تخت ساده E_0 که از بازوی مرجع به دوربین می‌رسد شکل می‌گیرد (شکل ۱ را ببینید):

$$H = |E_0 + E|^2 \quad (7)$$

تمام‌نگار دیجیتالی دوم با صفر قرار دادن مقدار دز جذبی D در روابط بالا تولید می‌شود. در واقع در شرایط تجربی، این تمام‌نگار دیجیتالی، موقعی در دوربین ثبت می‌شود که چشمه در چیدمان تداخل‌سنجی حضور نداشته باشد ($D=0$).

در روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتالی، طرح نوارهای تداخلی با محاسبه تبدیل فرنل مجموع تمام‌نگارهای دیجیتالی تولید شده شکل می‌گیرد. این مهم به صورت عددی و با محاسبه تبدیل فرنل، معادله (۶)، برای مجموع تمام‌نگارها $(H_1 + H_2)$ ، به جای میدان E' انجام می‌شود. جزئیات بیشتر درباره تاریخچه، روش کار و مدل‌سازی فرآیند دزیمتری به روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتالی را می‌توان در جای دیگر مطالعه کرد [۱۴].

¹Thermo-Optic Coefficient

محیط متلب، نقاط بیشینه و کمینه طرح نوارهای تداخلی، که به ترتیب متناظر با بیشینه و کمینه شدت در طرح نوارهای تداخلی هستند، به صورت خودکار شناسایی و شمارش شده‌اند. نتایج شمارش نوارها در شکل (۶) نشان داده شده است. جالب‌ترین نکته در این شکل، رابطه خطی موجود بین N و D در فانتوم آب برای باریکه‌هایی در گستره انرژی E از $0/5$ تا $3/5$ مگاالکترون‌ولت است. بررسی این شکل نشان می‌دهد که اگر انرژی باریکه الکترونی معلوم باشد، در اینصورت دز کل جذبی در ماده فانتوم می‌تواند به راحتی در دزیمتری با روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال، تنها با شمارش تعداد کل نوارها در طرح تداخلی ثبت شده برآورد شود:

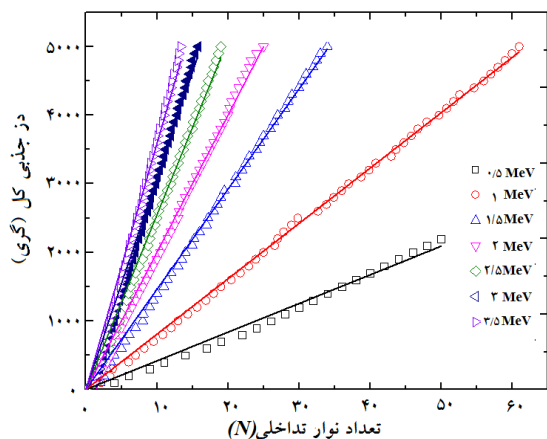
$$D = S(E)N \quad (۸)$$

که در آن $S(E)$ نشان‌دهنده شیب وابسته به انرژی خطوط $D-N$ در شکل (۶) است. به منظور ارتقای این ایده، از تحلیل رگرسیون خطی برای پیدا کردن شیب خطوط استفاده شده است. در شکل (۶)، شیب‌های به دست آمده به صورت تابعی از انرژی باریکه الکترونی رسم شده است. افزایش شیب خطوط با افزایش انرژی الکترون‌های برخوردی، بدان معنی است که برای یک مقدار ثابت از کل دز جذبی در آب، تعداد کم‌تری نوار تداخلی در طرح نوارهای تداخلی ذرات پرنانرژی حضور دارد (شکل ۵ را ببینید).

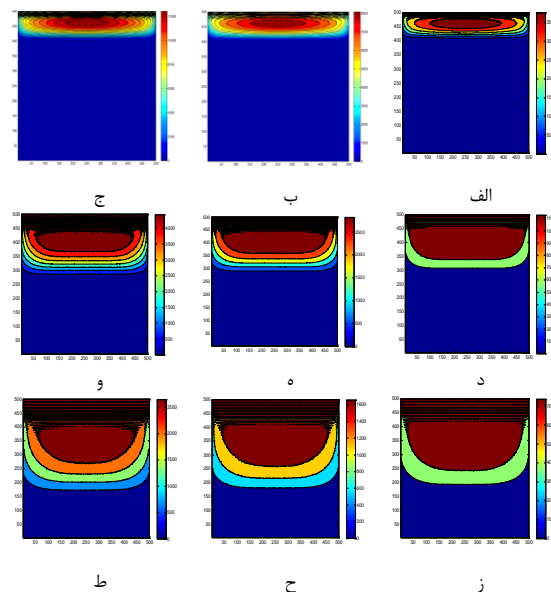
تحلیل رگرسیون خطی با استفاده از نرم‌افزار متلب بر روی داده‌های شکل (۶) بیانگر آن بود که تابع نمایی به شکل زیر از بهترین برازش روی داده‌ها برخوردار است:

$$S(E) = 88.7E^{1.1328} \quad (۹)$$

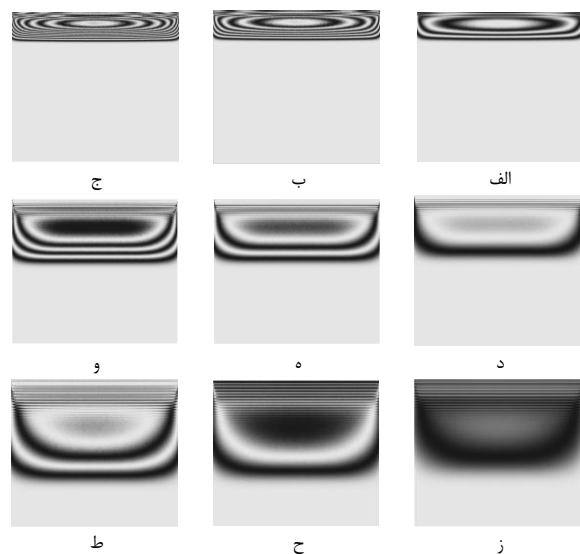
در این رابطه E انرژی بر حسب مگاالکترون‌ولت است. منحنی برازش شده مطابق با رابطه (۹) نیز با خط قرمز رنگ در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۶. رابطه خطی بین مقدار دز جذبی کل در آب توسط باریکه الکترونی در بازه انرژی $0/5$ تا $3/5$ مگاالکترون‌ولت و تعداد کل نوارهای تداخلی.



شکل ۴. ردیف‌های اول، دوم و سوم به ترتیب طرح نواحی هم‌دز مربوط به الکترون‌هایی با انرژی ۱، ۲ و ۳ مگا الکترون ولت و دز جذبی مطلق $0/5$ (الف، د، ز)، ۱ (ب، ه، ح) و $1/5$ کیلوگری (ج، و، ط) هستند.

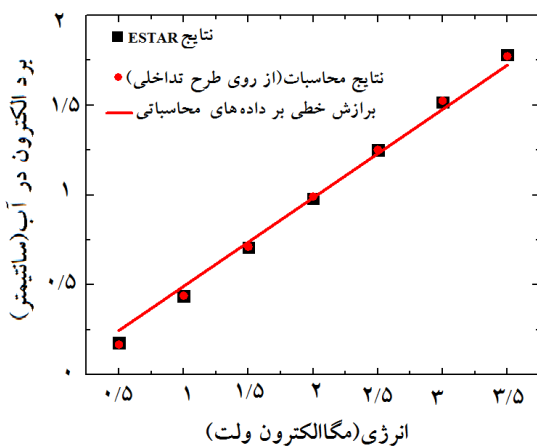


شکل ۵. طرح نوارهای تداخلی مربوط به الکترون‌هایی با انرژی ۱، ۲ و ۳ مگاالکترون‌ولت را برای دز جذبی مطلق $0/5$ (الف، د، ز)، ۱ (ب، ه، ح) و $1/5$ کیلوگری (ج، و، ط).

ویژگی قابل توجه دیگری که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، افزایش تعداد نوارهای تداخلی، که از این پس آن را با N نشان خواهیم داد، با افزایش مقدار کل دز جذبی D در فانتوم متشکل از ماده آب است. در گزارشی تجربی که پیش از این به چاپ رسیده است نیز به افزایش تعداد نوارهای تداخلی با افزایش دز در ماده فانتوم اشاره است [۱۹]. به منظور کمی‌سازی این وابستگی، تعداد کل نوارهای تداخلی در هر یک از طرح نوارهای به دست آمده در این کار، که تعدادی از آن‌ها در شکل (۵) نشان داده شده‌اند، شمارش شد. به این منظور با استفاده از برنامه‌نویسی در

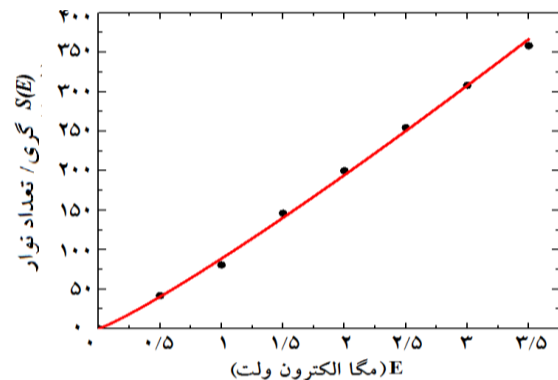
(۱۰) $R = 0.49213E$
 که در آن، R و E به ترتیب برد و انرژی الکترون‌ها با واحدهای سانتی‌متر و مگاالکترون‌ولت هستند. شیب خط به‌دست‌آمده بسیار نزدیک به شیب خط اندازه‌گیری شده تجربی خطوط $R-E$ الکترون‌های واردشده به آب است [۲۶].

برد الکترونی محاسبه شده با استفاده از طرح نوارهای تداخلی، که تعدادی از آن‌ها در شکل (۵) نشان داده شده‌اند، نیز با نقاط داده مربعی در شکل (۸) مشخص شده‌اند. خطای میانگین محاسبه شده بین بردهای محاسبه شده توسط کد ESTAR و روش ارائه شده در این مقاله حدود ۵/۰۴ درصد محاسبه شد. مقدار کم خطای میانگین محاسبه شده نیز بیانگر دقت روش ارائه شده در این کار است.



شکل ۸. نمودار برد محاسبه شده به ازای انرژی برای الکترون‌ها. (نقاط داده دایره‌ای شکل، بردهای محاسبه شده توسط کد ESTAR را مشخص می‌کنند. نقاط داده مربع شکل نیز بردهای محاسبه شده با استفاده از روش ارائه شده در این مقاله را نشان می‌دهند. منحنی برازش شده طبق رابطه (۱۰) نیز با خط قرمز رنگ در شکل مشخص شده است).

بایستی این نکته را خاطرنشان ساخت که در روش معمول مورد استفاده در سیستم‌های کالریمتری مبتنی بر روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال برای اندازه‌گیری دز جذبی، ابتدا تمام‌نگارهای دیجیتال ثبت شده توسط دوربین توسط رایانه بازسازی می‌شوند. پس از بازسازی، فاز جبهه موج‌های به دست آمده با استفاده از روش واپیچش فاز^۱ استخراج می‌شود [۱۰]. فرآیند واپیچش فاز تنها زمانی که طرح‌های فازی از تمام‌نگارهای باکیفیتی که در ثبت آن‌ها کم‌ترین میزان نوفه وجود داشته باشد، امکان‌پذیر است [۲۷]. حضور نوفه‌های با طبیعت تصادفی وابسته به زمان در شرایط تجربی باعث می‌شود که فرآیند واپیچش فاز بسیار دشوار و گاهی اوقات غیرممکن باشد [۲۸]. به همین دلیل،



شکل ۷. شیب خطوط $D-N$ در شکل (۵) به صورت تابعی از انرژی باریکه الکترونی E .

با بررسی روابط (۸) و (۹) می‌توان روشی ساده را برای اندازه‌گیری میزان دز مطلق در دزیمتری با استفاده از روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال ارائه کرد. با دانستن انرژی باریکه الکترون فرودی، شیب مربوط به خط $D-N$ را می‌توان با استفاده از رابطه (۹) بدست آورد. با قرار دادن تعداد نوار تداخلی شمارش شده در طرح نوارهای تداخلی N در رابطه (۸) و استفاده از شیب خط به دست آمده، دز جذبی مطلق در ماده فانتوم D را می‌توان به دست آورد. به منظور برآورد میزان صحت روش توصیف شده، دز جذبی کل با استفاده از روابط (۸) و (۹) اندازه‌گیری شده و با مقادیر اصلی دز محاسبه شده توسط کد MCNPX مقایسه گردید. خطای نسبی میانگین در تعیین مقادیر دز ۶/۵۱ درصد محاسبه شد. این خطا به سبب عدم قطعیت و خطای محاسباتی در تعیین شیب خط و برازش منحنی مطابق با روابط (۸) و (۹) است. خطا را می‌توان تا حدودی با استفاده از قدرت تفکیک بیش‌تر دز و انرژی در محاسبات مونت‌کارلو، برای کاهش عدم قطعیت در تعیین ضرایب ثابت در روابط (۸) و (۹) کاهش داد. به منظور اعتبارسنجی بیش‌تر روش و نتایج ارائه شده در این مقاله، برد الکترون‌ها با استفاده از کد محاسباتی ESTAR محاسبه شده است [۲۴]. همانطور که در توصیف شکل (۳) اشاره شد، مکان آخرین نوار تداخلی تاریک تعیین‌کننده برد ذرات تابشی در درون فانتوم در روش تداخل‌سنجی به روش تمام‌نگاری دیجیتال است. بنابراین با مقایسه برد الکترونی محاسبه شده توسط کد ESTAR با بردهای متناظر محاسبه شده از طرح نوارهای تداخلی به دست آمده در این کار، می‌توان روش ارائه شده در این کار را اعتبارسنجی کرد. در شکل (۸) برد الکترونی محاسبه شده با کد ESTAR در محدوده انرژی ۰/۵ تا ۳/۵ مگا الکترون‌ولت نشان داده شده است. به افزایش خطی برد با افزایش انرژی الکترون‌ها در گزارش‌های پیشین نیز اشاره شده است [۲۵] و [۲۶]. در بازه انرژی ذکرشده، با برازش خط روی داده‌ها رابطه زیر به‌دست‌آمده است:

^۱ Phase Unwrapping

- [8] Kazemi, E.; Shabani, A. M. H.; Dadfarnia, S.; Abbasi, A.; Vaziri, M. R. R.; Behjat, A. "Development of a Novel Mixed Hemimicelles Dispersive Micro Solid Phase Extraction Using 1-Hexadecyl-3-Methylimidazolium Bromide Coated Magnetic Graphene for the Separation and Preconcentration of Fluoxetine in Different Matrices before Its Determination by Fiber Optic Linear Array Spectrophotometry and Mode-Mismatched Thermal Lens Spectroscopy"; *Anal. Chim. Acta* 2016, 905, 85-92.
- [9] Schnars, U.; Falldorf, C.; Watson, J.; Jüptner, W. "Digital Holography and Wavefront Sensing"; Springer, 2015.
- [10] Cavan, A.; Meyer, J. "Digital holographic interferometry: A Novel Optical Calorimetry Technique for Radiation Dosimetry"; *Med. Phys.* 2014, 41.
- [11] Flores, M. E.; Malin M. J.; DeWerd, L. A. "Development and Characterization of an Interferometer for Calorimeter-Based Absorbed Dose to Water Measurements in a Medical Linear Accelerator"; *Rev. Sci. Instrum.* 2016, 87, 114301.
- [12] Miller, A.; Hussmann, E.; McLaughlin, W. "Interferometer for Measuring Fast Changes of Refractive Index and Temperature in Transparent Liquids"; *Rev. Sci. Instrum.* 1975, 46, 1635-1638.
- [13] Miller, A. "Holography and Interferometry in Dosimetry"; *Nukleonika* 1979, 24, 907-925
- [14] Beigzadeh, A. M.; Rashidian Vaziri, M. R.; Ziaie, F. "Modelling of a Holographic Interferometry Based Calorimeter for Radiation Dosimetry"; *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 2017, 864, 40-49.
- [15] Briesmeister, J. F. "MCNP-A general Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport"; Los Alamos National Laboratory, 1986.
- [16] Gabriel, C. "Tissue Equivalent Material for Hand Phantoms"; *Phys. Med. Biol.* 2007, 52, 4205.
- [17] Schnars, U. "Direct Phase Determination in Hologram Interferometry with Use of Digitally Recorded Holograms"; *J. Opt. Soc. Am. A* 1994, 11, 2011-2015.
- [18] Kazemi, E.; Dadfarnia, S.; Shabani, A. M. H.; Abbasi, A.; Vaziri, M. R. R.; Behjat, A. "Iron Oxide Functionalized Graphene Oxide as an Efficient Sorbent for Dispersive Micro-Solid Phase Extraction of Sulfadiazine Followed by Spectrophotometric and Mode-Mismatched Thermal Lens Spectrometric Determination"; *Talanta* 147, 561-568.
- [19] Jones, A. K.; Hintenlang, D. E.; and Bolch, W. E. "Tissue Equivalent Materials for Construction of Tomographic Dosimetry Phantoms in Pediatric Radiology"; *Med. Phys.* 2003, 30, 2072-2081.
- [20] Chartier, J. L.; Grosswendt, B.; Gualdrini, G. F.; Hirayama, H.; Ma, C. M.; Padoani, F.; Petoussi, N.; Seltzer, S. M.; Terrissol, M. "Reference Fluence-to-Dose-Equivalent Conversion Coefficients and Angular Dependence Factors for 4-Element ICRU Tissue, Water and PMMA Slab Phantoms Irradiated by Broad Electron Beams"; *Radiat. Prot. Dosim.* 1996, 63, 7-14.
- [21] Devanney, J. A. "The Use of a Holographic Interferometer to Measure Absorbed Energy Distributions in Water from Pulsed Electron Beams"; *Nucl. Instrum. Methods* 1974, 120, 77-84.
- [22] Hussmann, E. K.; McLaughlin W. L. "Dose-Distribution Measurement of High-Intensity Pulsed Radiation by Means of Holographic Interferometry"; *Radiat. Res.* 1971, 47, 1-4.
- [23] Tilton, L.; Taylor, J. "Refractive Index and Dispersion of Distilled Water for Visible Radiation, at Temperatures 0 to 60"; *J. Res. Natl. Bur. Stand.* 1938, 20, 419-477.

به طور معمول سیستم‌های تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال بر روی میزهای اپتیکی پایدارسازی شده طراحی و ساخته می‌شوند تا از گزند انواع گوناگون نوفه‌های محیطی مصونیت داشته باشند [۷ و ۱۲]. به طور قطع تأمین این شرایط آرمانی برای سیستم‌های کوچک و قابل حمل طراحی شده، که به این روش کار می‌کنند، امکان‌پذیر نیست. با استفاده از روش ارائه شده در این بخش، دز مطلق کل به طور مستقیم و تنها با شمارش تعداد نوارهای تداخلی، پس از محاسبه تبدیل فریل تمام‌نگارهای دیجیتال ترکیب شده، اندازه‌گیری شده و در آن نیازی به استفاده از روش‌های پیچیده واپیچش فاز حساس به نوفه [۲۸] برای تعیین میزان دز جذبی در محیط نیست.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه طراحی سیستم کالریمتری قابل حملی ارائه شده است که با استفاده از روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال قادر به تعیین میزان دز جذبی الکترون است. علاوه بر این، روش جدیدی برای تخمین میزان دز جذبی تابشی در ماده معادل بافت با هدف ساده، سریع و دقیق بودن اندازه‌گیری معرفی شده است. شبیه‌سازی روند کار سیستم طراحی شده در این مقاله برای پایش میزان دز جذبی مطلق حاصل از باریکه‌های الکترونی پرانرژی بیانگر آن است که خطای نسبی میانگین آن حدود ۶/۵۱ درصد است که می‌تواند با ارتقای فرآیندهای برازش منحنی کاهش یابد. در مطالعات آینده می‌توان با دقت بیشتری نقش گرمایش لیزر پایش مورد استفاده برای خوانش دز را مورد بررسی قرار داده و ضرایب تصحیحی احتمالی مورد نیاز برای استخراج مقادیر دقیق دز جذبی را ارائه کرد.

۵. مراجع ها

- [1] Lowenthal, G.; Airey, P. "Practical Applications of Radioactivity and Nuclear Radiations"; Cambridge University Press, 2001.
- [2] Rostami, Z.; Hamedian, M.; Mousavi, M. L. "Effect of Microwave Radiations on Cell Proliferation"; *Adv. Defence Sci. & Technol.* 2010, 1, 49-52.
- [3] Attix, F. H. "Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry"; John Wiley & Sons, 2008.
- [4] Hall, E. J.; Amato J. G. "Radiobiology for the Radiologist"; Lippincott Williams & Wilkins, 2006.
- [5] Guerra, A. S.; Laitano, R. F.; Pimpinella, M. "Gap Effect at Various Depths in Graphite Calorimeter: Experimental Determination with Variable Field Size at 60Co Gamma-Ray Beam"; *Proc. NPL Calorimetry Workshop*, 1994.
- [6] Low, D. "The Importance of 3D Dosimetry"; *J. Phys. Conference Series* 2015, 573, 012009.
- [7] Hussmann, E. "A Holographic Interferometer for Measuring Radiation Energy Deposition Profiles in Transparent Liquids"; *Appl. Opt.* 1971, 10, 182-186.

- [28] Ghiglia, D. C.; Pritt, M. D. "Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software"; New York, Wiley, 1998.
- [29] Vaziri, M. R. R.; Hajiesmaeilbaigi, F.; Maleki, M. H. "New Raster-Scanned CO₂ Laser Heater for Pulsed Laser Deposition Applications: Design and Modeling for Homogenous Substrate Heating"; Opt. Eng. 51, 044301-1.
- [30] Vaziri, M. R.; Hajiesmaeilbaigi, F.; Maleki, M. H. "Design and Modeling of a New CO₂ Laser Heater for Thin Film Deposition Applications"; Proc. of SPIE. 2012, 8557, 855711-1.
- [24] Brice, D. K. "Stopping Powers for Electrons and Positrons"; ICRU Report , 37 International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, Maryland, USA, 1984, p.271.
- [25] Cleland, M. R.; Parks, L. A. "Medium and High-Energy Electron Beam Radiation Processing Equipment for Commercial Applications"; Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., B. 2003, 208, 74-89.
- [26] Hamm, R. W.; Hamm, M. E. "Industrial Accelerators and Their Applications"; World Scientific, 2012.
- [27] Malacara, Z.; Servin, M. "Interferogram Analysis for Optical Testing"; CRC press, 2016.