

## تداخل سنجی تقویت کننده دیسکی Nd:Glass

فاطمه السادات تحصیلداران فرد<sup>۱</sup>، امیر حسین فرهد<sup>۲</sup>، نادر مرشدیان<sup>۳</sup>، مصطفی ترکاشوند<sup>۴</sup>، ابراهیم آقایی<sup>۵</sup>

**چکیده:** در این تحقیق اثرات ناشی از دمش برای تقویت کننده دیسکی Nd:Glass به کمک روش تداخل سنجی مورد مطالعه تجربی قرار گرفته است. برای این منظور دو آرایش به ترتیب متشکل از هفت و یک دیسک در زاویه بروسر به کمک چهار لامپ درخش با انرژی کل ۳/۱ و ۱/۸ کیلوژول تحت دمش نوری قرار گرفتند. تحلیل نوارهای تداخلی، سه ناحیه را در حوزه زمان نشان می دهند: ارتعاش و جذب تابش تا خاتمه دمش نوری، ارتعاش و هدایت گرمایی تا پایان ارتعاشات مکانیکی ناشی از موج ضربه لامپ ها، و ترکیبی از هدایت گرمایی و گرمایش مجدد دیسک ها از طریق فرآیند همرفت گاز داغ مجاور لامپ ها تا خنک شدن کامل دیسک ها، که خاتمه هر ناحیه به ترتیب تا ۱ میلی ثانیه، ۱۰ میلی ثانیه و حداقل تا یک دقیقه پس از تحریک لامپ ها قرار دارد. پایان ناحیه نخست یا ناحیه دمش به ویژگی های مدار دشارژ لامپ ها بستگی دارد و دو ناحیه دیگر که در آنها ارتعاشات مکانیکی و فرآیندهای گرمایی مکانیسم های اصلی به شمار می آیند، به ساختار مکانیکی تقویت کننده و چگونگی نصب و استقرار دیسک ها در مکان خود، خصوصیات گرمایی دیسک های شیشه ای و نحوه خنک کردن آنها بستگی دارد.

**واژه های کلیدی:** تداخل سنجی، تقویت کننده های دیسکی، لیزرهای Nd:Glass، اثرات گرمایی.

### ۱. مقدمه

تقویت کننده های دیسکی برای تقویت تپ های کوتاه لیزر در سیستم های لیزری پر انرژی به ویژه در طبقات خروجی مجموعه های لیزری کاربرد دارند [۵-۱]. در این حال حفظ کیفیت باریکه های لیزر در عبور از اجزاء نوری از اهمیت خاصی برخوردار است زیرا میدان های نوری پر توان لیزر با شدت بیش از  $10^{10} W cm^{-2}$  به سادگی می تواند منجر به بروز اثرات

غیر خطی و معمولاً مخرب در سطح و حجم قطعات شوند. از این رو کاستن از طول محیط های نوری به ویژه برای تقویت کننده ها حایز اهمیت فراوان است. تقویت کننده های دیسکی در مقایسه با تقویت کننده های میله ای از سه مزیت کوتاهی طول محیط فعال، یکنواختی مکانی بسیار بیشتر ناحیه دمیده شده و افزایش قابل توجه نسبت سطح به حجم محیط فعال برای خنک سازی برخوردار هستند [۶]. روش های پویا برای مطالعه یکنواختی دمش بر پایه تداخل سنجی با استفاده از تداخل سنج ماخ-زندر و یا هولوگرافی با استفاده از لیزرهای تپی قرار دارد [۹-۷]. در تحقیق حاضر اطلاعات بدست آمده از تداخل سنج ماخ-زندر برای مطالعه و تحلیل تجربی روند زمانی و مکانی فرآیند دمش دیسک های لیزر شیشه نئودیمیم مورد استفاده قرار گرفته است. بخش ۲ به معرفی آرایش تجربی مورد نظر اختصاص دارد و نتایج حاصل از

(۱) دانشجو، گروه فیزیک، خیابان ملاصدرا - خیابان شیراز جنوبی - کوچه سرو - دانشکده علوم پایه - گروه فیزیک.

(۲) استاد راهنما، پژوهشکده فیزیک پلاسما و گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، سازمان انرژی اتمی ایران، انتهای کارگر شمالی، تهران. آدرس پست الکترونیک:

[ahfarahbod@yahoo.com](mailto:ahfarahbod@yahoo.com)

(۳ و ۴ و ۵) اعضاء پژوهشکده فیزیک پلاسما و گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، سازمان انرژی اتمی ایران، انتهای کارگر شمالی، تهران.

در تجربه های تداخل سنجی، دو آرایش با ۷ و ۱ دیسک تحت زاویه بروستر نسبت به راستای انتشار باریکه لیزر مورد بررسی قرار گرفتند. قطر و ضخامت دیسک های شیشه ای لیزر به ترتیب ۲۷ و ۶ میلیمتر و سایر پارامترهای فیزیکی شیشه ها مطابق با مرجع [۱۰] است. کاواک تقویت کننده متشکل است از بازتابنده استوانه ای به طول ۳۰ و قطر ۱۳ سانتیمتر که پوشش تمام بازتابانی از طلا دارد. ۴ لامپ درخش با طول قوس ۲۵ سانتیمتر و قطر بیرونی ۱۶ میلیمتر در دو مدار مستقل دشارژ هر یک شامل ۴۰۰ و یا ۳۰۰ میکروفاراد بانک خازنی در حالت نزدیک میرائی بحرانی عمل دمش نوری را انجام می دهند.

فرمان های تحریک برای محرک های لامپ ها و فرمان باز شدن دریچه الکترونیکی دوربین CA، برای جلوگیری از بروز اختلال الکترومغناطیسی به کمک فیبر نوری و تاخیر دهنده دیجیتال با دقتی به مراتب بهتر از ۱ میکروثانیه تامین می شود. اما تفکیک زمانی دوربین در بهترین حالت تنها ۴۰ میکروثانیه از لحظه آغاز تصویر برداری است که حد تفکیک زمانی - فضائی سیستم تداخل سنج محسوب می شود.

برای جلوگیری از انتقال ارتعاشات ناشی از تخلیه الکتریکی لامپ های درخش، میز تداخل سنج از نظر مکانیکی کاملاً از میز تقویت کننده جدا است. پایه های میز تقویت کننده به کمک جاذب های مناسب ضد ارتعاش از کف آزمایشگاه جدا شده اند. وزن رویه و پایه میزی که صفحه تداخل سنج بر روی آن قرار دارد حدود ۷۵۰ کیلوگرم است و اجزاء تداخل سنج بر روی صفحه فولادی به ضخامت ۱۰ میلیمتر و ابعاد ۷۰ در ۵۰ سانتیمتر نصب شده اند. تقویت کننده حاوی دیسک ها به کمک سه جک اپتیکی و حدود ۱۷۰ کیلوگرم وزنه و ۴ پایه مغناطیسی در مکان مناسب با قابلیت تنظیم ارتفاع و موقعیت عرضی نصب شده است. تمهیدات اشاره شده از اهمیت فوق العاده بالایی برای جدا کردن ارتعاشات از تداخل سنج و مشاهده نوارهای تداخلی در حوزه های زمانی کمتر از ۱ ثانیه برخوردار

تداخل سنجی و تحلیل آنها در بخش ۳ ارائه خواهد شد. مشاهدات نشان می دهند که به ازای ۱/۸ کیلوژول انرژی دمش، اختلاف راه نوری ناشی از جذب انرژی دمش در جسم محیط فعال در فاصله زمانی ۸۰۰ میکروثانیه پس از آغاز دمش نسبت به پیش از دمش در سراسر سطح و حجم دیسک عملاً یکنواخت است و مقدار آن بیش از ۳٪ نیست. همچنین برای انرژی دمش ۱/۸ کیلوژول، به شرط رعایت تمامی جوانب مهندسی لازم، ارتعاش مکانیکی دیسک ها ناشی از موج ضربه حاصل از تخلیه الکتریکی لامپ های درخش ناچیز است و نقش چندانی در اعوجاج جبهه موج عبوری ندارند.

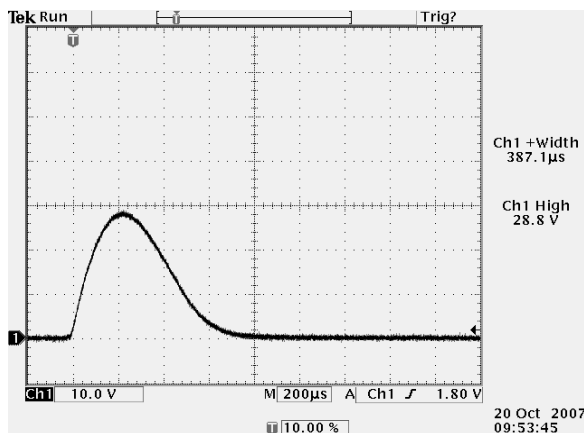
## ۲. روش کار

برای مطالعه تجربی فرآیند دمش نوری، آرایشی متشکل از تداخل سنج ماخ-زندر با طول بازوهای ۶۴ و ۲۱ سانتیمتر مورد استفاده قرار گرفت که تقویت کننده دیسکی در یکی از بازوهای آن قرار دارد، شکل ۱. برای ایجاد الگوی تداخلی از یک لیزر هلیوم- نئون با اندازه لکه حدود ۰/۵ میلیمتر استفاده شد. قطر باریکه خروجی از لیزر هلیوم- نئون پس از گسترده شدن به کمک عدسی مقعر L1، در نقطه ورود به تقویت کننده ۱۲ میلیمتر است. برای یکسان نمودن توزیع شدت باریکه خروجی از تقویت کننده و باریکه مرجع، و رسیدن به تمایز شدت مناسب برای نوارهای تداخلی از تضعیف کننده ND استفاده شده است. آینه های M تداخل سنج تمام بازتابان و از جنس آلومینیم هستند. برای شکافنده های پرتو BS ابتدا از دو آینه با بازتابندگی ۱۰۰ درصد در ۱۰۶۴ نانومتر استفاده شد که بازتابندگی آن در طول موج لیزر هلیوم- نئون در حد ۵۰ درصد است و الگوهای تداخلی شکل ۳، ۵ و ۶ به این ترتیب تهیه شده اند، اما کیفیت نامطلوب سطح آنها سبب شد تا در اندازه گیری های شکل ۴ از دو تیغه بدون پوشش به ضخامت ۱۰ میلیمتر و صافی سطح بسیار بهتر استفاده کنیم.

قطر بیرونی ۴۰ میلیمتر قرار گرفته اند انجام دادیم. بدین ترتیب امکان هر گونه ارتعاش از دیسک لیزر حداقل تا انرژی دمش ۱/۸ کیلوژول سلب شد و عملاً امکان ثبت نوارهای تداخلی از نخستین لحظات دمش فراهم آمد.

### ۳. مشاهدات تجربی و تحلیل آنها

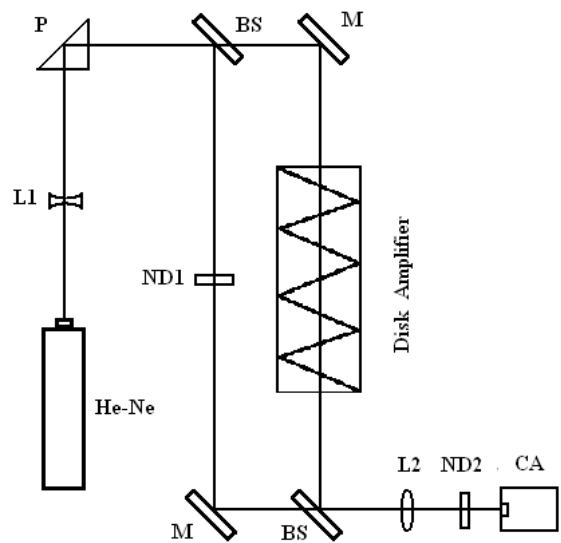
نمونه ای از رفتار زمانی پالس جریان یکی از دو مدار لامپ ها در شکل ۲ نشان داده شده است. پهنای کل جریان لامپ را می توان تقریباً با  $\tau \approx 3\sqrt{LC}$  نشان داد که  $L$  و  $C$  به ترتیب خود القا و ظرفیت بانک خازنی مدار تخلیه است [۶]. اندازه گیری ها با یک فوتودیود و اسیلوسکوپ سریع نشان دادند که رفتار زمانی تپ نوری لامپ شباهت فراوانی با تپ جریان دارد و تنها تپ نوری لامپ با تاخیری در حد ۵۰ میکروثانیه نسبت به نقطه شروع جریان لامپ آغاز می شود. بنابراین نوردهی و موج ضربه ناشی از تخلیه الکتریکی لامپ ها با توجه به سرعت انتشار صوت در جامدات که از مرتبه  $10^7$  سانتیمتر بر ثانیه است، کم و بیش همزمان به محیط فعال و دیسک لیزر اعمال می شود.



شکل ۲. نمونه ای از پالس جریان برای دو لامپ درخش که بطور سری با یکدیگر قرار گرفته اند. ظرفیت خازن ۴۰۰ میکروفاراد و انرژی تخلیه الکتریکی ۱/۵۷ کیلوژول می باشد. هر خانه عمودی معادل با ۱۰۰۰ آمپر است.

تصاویر ثبت شده از الگوی تداخلی مرکزی سیستم نوارهای تداخل سنج از لحظه تحریک لامپ ها تا پایان

است. در آغاز مطالعات تجربی علیرغم جدا کردن میز تقویت کننده از میز تداخل سنج و استفاده از بالشتک های ضد ارتعاش، اندکی از موج ضربه ناشی از روشن شدن لامپ های فلاش تا حدود ۴۰۰ میلی ثانیه پس از آغاز عمل دمش به میز تداخل سنج منتقل می گردید و نوارهای تداخلی قابل مشاهده نبود و تنها پس از میرا شدن ارتعاشات، اثرات گرمایی و روند خنک شدن دیسک های لیزر، از لحظه ۱ ثانیه پس از عمل دمش قابل مشاهده بود.



شکل ۱. آرایش نوری مورد نظر برای تداخل سنجی تقویت کننده دیسکی. P منشور ۴۵ درجه، BS شکافنده پرتو، M آینه تمام بازتابان، ND تضعیف کننده نوری، L عدسی و CA دوربین می باشد.

دیسک های لیزر درون نگهدارنده های فلزی تحت زاویه برونستر و به کمک ۳ میله فولادی به قطر ۲ میلیمتر و دو نگهدارنده انتهائی در جای خود مستقر شده اند. برای آرایش با ۷ دیسک تجربه نشان داد که بدین ترتیب نمی توان بر ارتعاش ساختار نگهدارنده دیسک ها تا کمتر از ۰/۴ ثانیه غلبه نمود. لذا بقیه آزمایش ها و نتایج ارائه شده در بخش ۳ تنها با یکی از دیسک ها و به کمک دو نگه دارنده جانبی و میله های فولادی که همگی درون لوله ای از جنس پیرکس به

$$\Delta n = \frac{3\lambda \sin(\theta_B)}{d} \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $d$  ضخامت دیسک و برابر با ۶ میلیمتر است.  $\theta_B$  یا زاویه بروستر با توجه به ضریب شکست دیسک شیشه ای برابر با ۵۷ درجه است. با قرار دادن مقادیر عددی در رابطه (۱) تغییرات نسبی راه نوری و ضریب شکست دیسک بدست می آید، روابط (۲) و (۳).

$$\Delta n = 2/65 \times 10^{-4} \quad (2)$$

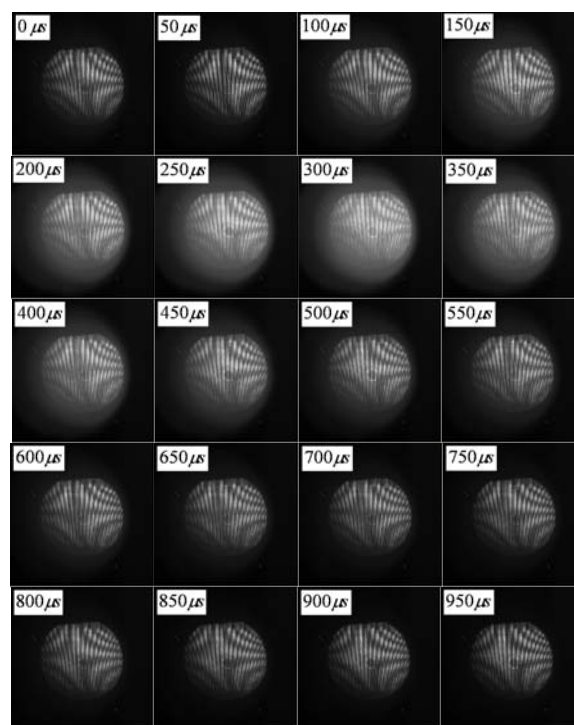
$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta n}{n} \approx 1/72 \times 10^{-4} \quad (3)$$

در شکل ۴ رفتار زمانی تغییرات راه نوری  $\Delta L$  در مرکز دیسک لیزر، حین عمل دمش اپتیکی ترسیم شده است.

بررسی بیشتر الگوهای تداخلی شکل ۳ با الگوی تداخلی مرجع شکل ۷ در غیاب دمش محیط، نشان می دهد که دمش نوری کاملاً یکنواخت صورت گرفته است و عملاً اعوجاج و تفاوتی میان این دو الگوی تداخلی مشاهده نمی شود. با افزایش انرژی دمش از ۱/۸ به ۳/۱ کیلوژول، به دلیل ارتعاشات مکانیکی امکان ثبت الگوهای تداخلی با تفکیک زمانی سیستم موجود، حداقل تا ۱۰ میلی ثانیه پس از لحظه تحریک لامپ ها وجود ندارد، شکل ۵.

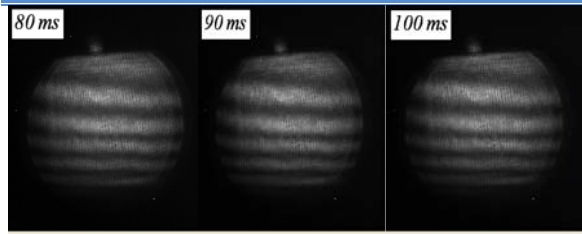
با گذشت زمان و اتمام زمان نوردهی لامپ ها، ارتعاشات مکانیکی محیط فعال ناشی از موج ضربه لامپ ها با انرژی بالا می تواند تا میرائی کامل ادامه یابد. پس از خاتمه ارتعاشات، گرمایش دیسک های لیزر همچنان از طریق انتقال گاز گرم مجاور لامپ ها و جریان همرفت ادامه می یابد. با توجه به بزرگی ابعاد لامپ های درخش و مقایسه نسبت تقریباً ۴۴ برابری حجم جدار شیشه ای لامپ ها با حجم دیسک شیشه لیزر  $\frac{\Delta V_{Lamp}}{\Delta V_{Disk}}$ ، رابطه (۴)، می توان گفت که تمام تغییرات نوارهای تداخلی پس از ۱۰ میلی ثانیه، به مکانیسم اشاره شده مربوط می شود.

مرحله تخلیه الکتریکی و نوردهی لامپ برای انرژی دمش ۱/۸ کیلوژول با تفکیک زمانی ۵۰ میکروثانیه در شکل ۳ آورده شده است. با مقایسه نور زمینه تصاویر به خوبی ملاحظه می شود که قله تپ نوری لامپ در حدود ۲۵۰ میکروثانیه از نقطه آغاز عمل تخلیه الکتریکی قرار دارد که با قله نمودار جریان و تفکیک زمانی دوربین سازگار است. لکه مرکزی سیستم نوارهای تداخلی در لحظه نخست طی ۱ میلی ثانیه ۳ بار تاریک می شود که معادل است با  $3\lambda$  اختلاف راه نوری طی مدت مذکور که هر اختلاف راه به اندازه طول موج نور  $\lambda = 633 \text{ nm}$ ، به ترتیب در لحظه ۲۰۰، ۴۰۰ و ۵۵۰ میکروثانیه اتفاق می افتد.

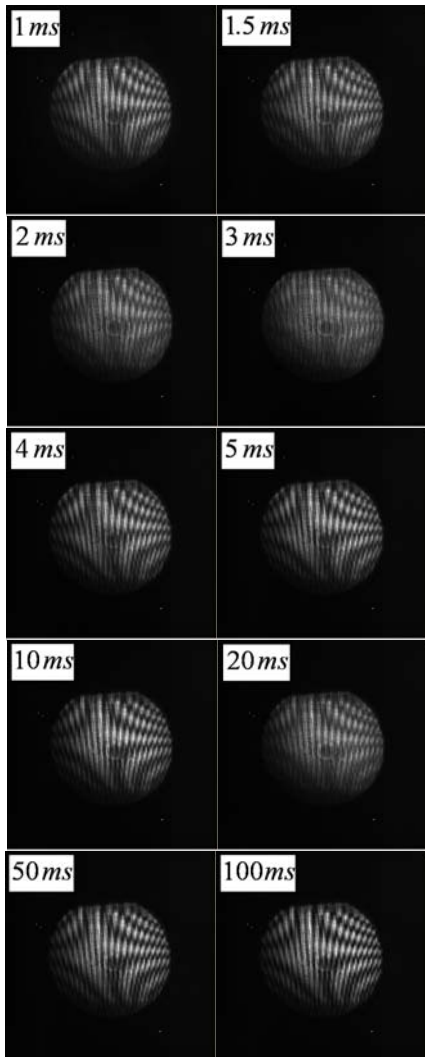


شکل ۳. روند زمانی تغییرات الگوی تداخلی مرکزی تداخل سنج حین عمل دمش نوری برای یک دیسک لیزر از لحظه تحریک لامپ های درخش تا ۱ میلی ثانیه پس از آن. ظرفیت خازن ۴۰۰ میکروفاراد و انرژی دمش ۱/۸ کیلوژول می باشد.

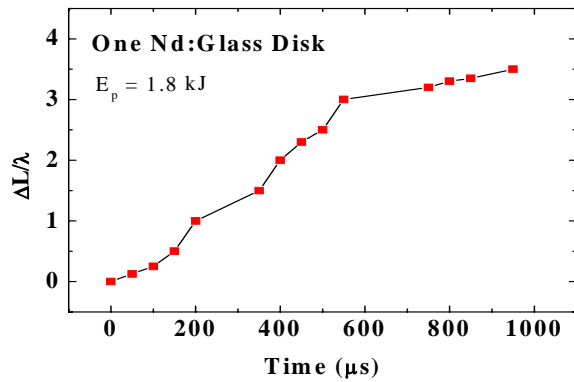
بدین ترتیب تغییر ضریب شکست دیسک لیزر  $\Delta n$  با رابطه (۱) داده می شود.



شکل ۵. روند تغییرات الگوی تداخلی حین عمل دمش نوری برای یک دیسک لیزر در فاصله زمانی ۰ تا ۱۰۰ میلی ثانیه از لحظه تحریک لامپ های درخش. در این تجربه تداخل سنج برای تولید نوارهای تداخلی موازی تنظیم شده است. ظرفیت خازن ۳۰۰ میکروفاراد و انرژی دمش ۳/۱ کیلوژول است.



شکل ۶. روند زمانی تغییرات الگوی تداخلی مرکزی تداخل سنج پس از عمل دمش نوری برای یک دیسک لیزر در فاصله زمانی ۱ تا ۱۰۰ میلی ثانیه از لحظه تحریک لامپ های درخش. ظرفیت خازن ۴۰۰ میکروفاراد و انرژی دمش ۱/۸ کیلوژول است.

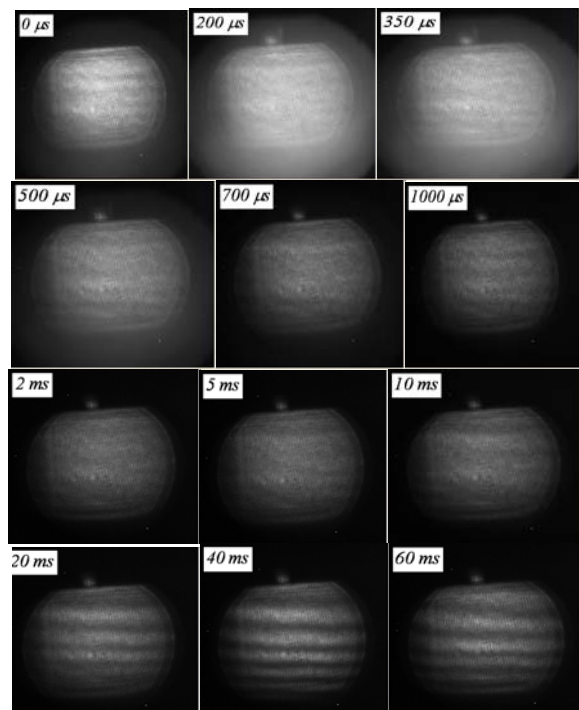


شکل ۴. رفتار زمانی تغییر راه نوری  $\Delta L$  در مرکز دیسک لیزر حین عمل دمش نوری. ظرفیت خازن ۴۰۰ میکروفاراد و انرژی دمش ۱/۸ کیلوژول می باشد.

در رابطه (۴) به ترتیب  $N$ ،  $L_{Lamp}$ ،  $R_{Lamp}$  و  $\Delta R$ ، تعداد، طول، شعاع بیرونی و ضخامت جداره لامپ می باشد.  $d$  و  $R_{Disk}$  نیز ضخامت و شعاع دیسک لیزر است.

$$\frac{\Delta V_{Lamp}}{\Delta V_{Disk}} = \frac{N \times 2\pi L_{Lamp} R_{Lamp} \Delta R}{\pi d R_{Disk}^2} = 43/9 \quad (4)$$

با توجه به جنس برنجی بازتابنده های درون کاواک که دارای پوشش طلا هستند، انرژی اندک جذب شده در آنها به سرعت از طریق هدایت گرمایی از فضای درونی کاواک به بیرون هدایت می شود.

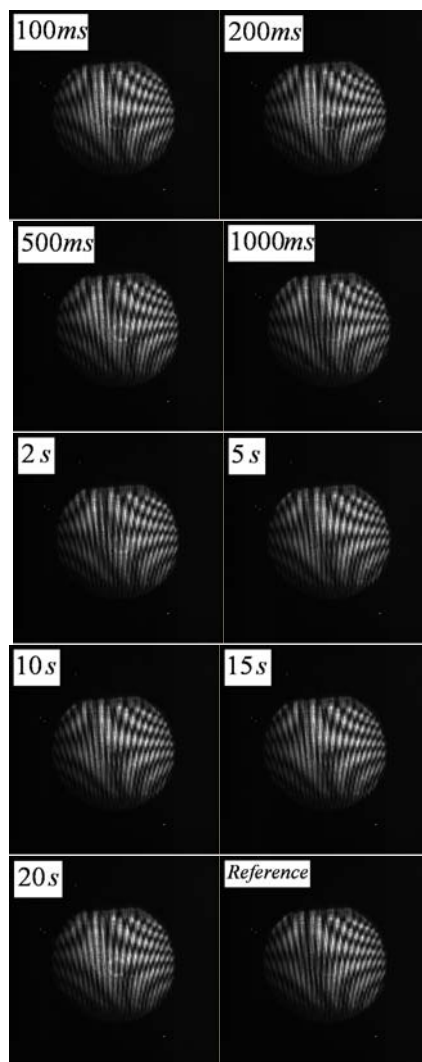




### ۵. نتیجه گیری

کیفیت اپتیکی محیط تقویت کننده دیسکی و یکنواختی نوردهی محیط فعال حین عمل دمش نوری به ویژه هنگام عبور تپ لیزر از میان تقویت کننده حائز اهمیت فراوان است، زیرا تپ عبوری لیزر با پهنای در حد ۵ تا ۱۰ نانوثانیه در این مرحله و معمولاً به فاصله چند صد میکروثانیه از لحظه دمش و به هنگام بیشترین افزایش انبوهی وارون محیط فعال از آن عبور می نماید. با توجه به اینکه عمل دمش اپتیکی در مدت زمانی در حد طول عمر تراز بالائی محیط فعال لیزر صورت می گیرد و نرخ تکرار دمش برای محیط فعال شیشه با ابعاد بزرگ که در حد دقیقه و بیشتر است، بروز تغییرات اپتیکی در محیط حین عمل دمش در مقایسه با پس از مرحله نور دهی محیط فعال از اهمیت بسیار بیشتری برخوردار است. در مرحله دمش و مراحل پس از آن فرآیندهای گرمائی و مکانیکی نقش اصلی را به عهده دارند. در نخستین مرحله، جذب مستقیم تابش لامپ در محیط فعال دیسک سبب بروز گرما در موضع جذب نور و بروز اثرات گرما نوری در محیط می شود. رفتار الگوی تداخلی و محفوظ ماندن تقارن فضائی آن نشان می دهد که در مرحله دمش جذب بصورت یکنواخت در سراسر دیسک صورت می گیرد. در مراحل پس از تابش دهی نیز دفع گرما از محیط و گرمایش مجدد آن به دلیل جریان گاز داغ که از گرم شدن گاز در سطح لامپ ها و جریان همرفت به سمت دیسک ها به وقوع می پیوندد (در حد دقت تفکیک زمانی دوربین، ۴۰ میکروثانیه)، عملاً یکنواخت است. مرحله اخیر تا ده ها ثانیه پس از تخلیه انرژی در لامپ ها می تواند ادامه یابد و مدت زمان خنک شدن به تعداد لامپ ها، انرژی تخلیه تحویل شده به آنها، جریان گاز خنک کننده، ساختار هندسی کاواک و ابعاد دیسک شیشه ای بستگی دارد.

همچنین با توجه به سطح درونی بزرگ بازتابنده ها که بسیار بزرگتر از سطح بیرونی داغ لامپ ها و سطح دیسک لیزر است، می توان بازتابنده ها را در غیاب جریان گاز ازت که معمولاً برای خارج کردن اکسیژن از مجاورت لامپ برای کاستن از جذب پرتو لامپ ها در اکسیژن و بروز موج ضربه به کار می رود [۱۰]، مهمترین عامل انتقال گرما پس از دمش نوری به شمار آورد.



شکل ۷. روند زمانی تغییرات الگوی تداخلی پس از عمل دمش نوری برای یک دیسک لیزر در فاصله زمانی ۱۰۰ میلی ثانیه تا ۲۰ ثانیه پس از لحظه تحریک لامپ های درخش. الگوی تداخلی پس از خنک شدن کامل محیط فعال (بیش از یک دقیقه) نیز به عنوان مرجع مقایسه در آخرین تصویر آمده است. شرایط دمش نظیر شکل ۵ است.

## مراجع

- [1] Martin W. E., J. B. Trenholme, G. J. Linford, S. M. Yarema and C. A. Harley, *Solid-State Disk Amplifiers for Fusion Laser System*, IEEE Journal of Quantum Electron. Vol. QE-17, No. 9, 1981, pp. 1744.
- [2] Hunt John T., D. Ralph Speck, *Present and Future Performance of the Nova Laser System*, Optical Engineering, Vol. 28, No. 4, 1989, pp. 461- 468.
- [3] Van Wonterghem Bruno M., John R. Murray, Jack H. Campbell, D. Ralph Speck, Charles E. Barker, Ian C. Smith, Donald F. Browning, and William C. Behrendt, *Performance of a Prototype for a Large-Aperture Multipass Nd:Glass Laser for Inertial Confinement Fusion*, Appl. Opt. Vol. 36, No. 21, 1997, pp. 4932-4953.
- [4] Andre Michel L., *The French Megajoule Laser Project (LMJ)*, Fusion Engineering and Design, Vol. 44, 1999, pp.43.
- [5] Miller George H., Edward I. Moses and Craig R. Wuest, *The National Ignition Facility: Enabling Fusion Ignition for the 21<sup>st</sup> Century*, Nuclear Fusion, Vol. 44, 2004, pp. S228-S238.
- [6] Koechner W., *Solid-State Laser Engineering* Springer-Verlag, Fifth edition, 1999.
- [7] McMahon J. M., J. L. Emmett, J. F. Holzrichter, and J. B. Trenholme , *A Glass-Disk-Laser Amplifier*, IEEE Journal of Quantum Electron..Vol. QE-9, No. 10, 1973, pp. 992-999.
- [8] Linford Gary J., Henry H. Chau, James A. Glaze, Clyde B. Layne, and Frank Rainer, *Pump-induced of Optical Distortions in Disk Amplifier Modules: Holographic and Interferometric Measurements*, Appl. Opt. Vol. 14, No. 12, 1975, pp. 3057-3061.
- [9] Burdonsky J. N., E. V. Zhuzhukalo, N. G. Kovalsky, A. N. Kolomiisky, M. I. Pergament, Yu. P. Rudnitsky, and R. V. Smirnov, *High Power Output Stages of a Nd:Glass Laser System for Fusion Applications*, Appl. Opt. Vol. 15, No.6, 1976, pp. 1450-1452.
- [۱۰] فرهبد، امیر حسین، رسول بری، فاطمه السادات تحصیلداران، هادی موحدی نژاد، «تقویت کننده دیسکی دو عبوری Nd: Glass»، شانزدهمین کنفرانس انجمن اپتیک و فوتونیک ایران، دانشگاه یزد، بهمن ماه ۱۳۸۸.