بررسی و ساخت جاذب اشباع پذیر از نانولوله کربنی تک دیواره به روش لایه نشانی تبخیر عمودی به منظور استفاده از آن در لیزر قفل شده مدNd:YAG

سمیه اسکندری[۱]، محمود حسینی فرزاد[۱]، محمد مهدی درودمند[۲] و مهدی موسوی[۳]

[۱]دانشگاه شیراز- بخش فیزیک، [۲]دانشگاه شیراز -بخش شیمی، [۳] پژوهشکده اپتیک و لیزر اصفهان

چکیده – امروزه جاذب‌های اشباع‌پذیر نانولوله کربنی تک دیواره به طور موفقیت آمیزی برای تولید پالسهای کوتاه در لیزرهای گوناگون مانند لیزرهای حالت جامد، فیبری و نیمه‌رسانا به کار می‌روند، در این مقاله سعی شده است که با تهیه نمونه‌هایی از این نانولوله‌ها با روش لایه نشانی تبخیر عمودی پارامترهای موثر برای ساخت بهینه آنها را مورد بررسی قرار دهیم. سپس با قرار دادن این نمونه‌ها در محل مناسبی در داخل کاواک لیزر *Nd:YAG* پالسی قابلیت آنها در منظم‌سازی شکل پالس خروجی یا هم‌فازسازی مدهای طولی این لیزر را به صورت تجربی مورد مطالعه قرار میدهیم. بررسی شکل پالس‌های خروجی اندازه‌گیری شده نوید دست‌یابی به پالس‌های بسیار کوتاه حاصل از فرآیند قفل‌شدگی مد را میدهدچنانچه موفق به تهیه نمونه های عاری از گرد و غبار و تجمع دسته جمعی نانو لوله ها گردیم.

کلید واژه- پالس‌های بسیار کوتاه، روش تبخیر عمودی، قفل شدگی مد، نانولوله کربنی.

Investigation and Fabrication of Single-Wall Carbon Nano-Tubes Saturable Absorber by Vertical Evaporation Method in order to use in Mode-Locked Nd:YAG Laser

Somaye Eskandari[1], MahmoodHosseiniFarzad[1], Mohammad Mahdi Doroodmand[2], Mahdi Moosavi[3]

1Department of Physics, Shiraz University, Shiraz, Iran 2Department of Chemistry, Shiraz University, Shiraz, Iran 3Esfahan Institute of Optics and LASER

Abstract- Nowadays single-wall carbonnano-tubes saturable absorbers are used successfully for short pulse generation in different LASERs such as solid-states, fibers and semiconductors lasers. In this paper we fabricate some samples contain this nano-tubes by vertical evaporation method in order to study different parameters that affect to obtain the best ones. Then, by inserting these samples inside the Nd:YAG laser resonator, in a suitable position, their capability of ordering the shape of the output pulse or phase- Locking the longitudinal modes of the laser is experimentally investigated. By study the shape of the output pulses we hope to obtain ultra-short pulses due to the mode-locking process, this happens when we fabricate samples without dust and cluster of nano-tubes

Keywords: Ultra Short Pulse, vertical evaporation method, mode locking, carbon nano-tube

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-20]

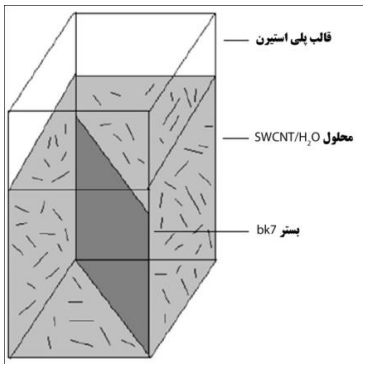
۱- مقدمه

لیزرهای فوق سریع در زمینه‌های مختلف کاربردهای متنوعی دارند. طراحی و ساخت محیط‌های بهره جدید و رشد تکنیک‌های به کار رفته در لیزرهای قفل‌شده مد و از جمله آینه‌های جاذب اشباع‌پذیر(SESAM) چشم‌انداز و دورنمای لیزرهای فوق سریع را در دو دهه گذشته بطور شگرفی تغییر داده است[1] . این پیشرفت‌ها، مخصوصاً تکنیک‌های قفل‌کنندگی مد، کاربردهای پالس‌های فوق سریع را به نواحی وسیع‌تری نسبت به گذشته کشانده است. با این وجود، فناوری قفل‌شدگی مد در لیزرها با مشکلاتی نیز روبرست. از جمله در لیزرهای قفل‌شده مد کر لنز برای شروع کار به یک اختلال خارجی نیاز است و به شدت نسبت به تنظیم قطعات اپتیکی در کاواک لیزر حساس هستند[2]. تحقیق بر روی مواد جاذب اشباع‌پذیر جایگزین و جدید، برای لیزرهای قفل‌شده مد غیرفعال در چند دهه اخیر افزایش یافته است[3]. جاذب‌های اشباع‌پذیر قدیمی مانند رنگ‌های ارگانیکی[4] و بلورهای تزریق شده با یون[3]، محدودیت‌های جدی در پایداری و عملکرد (زمان پاسخ‌دهی، محدوده طول‌موجی باریک پاسخ‌دهی) و هزینه بالای تولید دارند[1]. در مقابل نانولوله‌های کربنی تک دیواره (SWCNT) به عنوان مواد جاذب اشباع‌پذیر جدید و جایگزین، عملکرد با کیفیت‌تری را فراهم می‌کنند. زمان بازیابی در این نوعجاذب‌ها در حد پیکوثانیه و پایداری شیمیایی، مکانیکی و محیطی آنها بالاتر است. لیزرهای قفل‌شده مد با جاذب SWCNT در مواردی مانند اندازه‌گیری‌های صنعتی، نمونه‌برداری اپتیکی و اندازه‌گیری فرکانس نوری مورد استفاده قرار می‌گیرند[5,6,7]. جاذب‌های اشباع‌پذیر نانولوله کربنی تک دیواره، به طور موفقیت آمیزی در لیزرهای گوناگون مانند لیزرهای حالت جامد، فیبر و نیمه‌رسانا به کار رفته‌اند[8]در مقایسه با لیزرهای فیبر، بهینه‌سازی جاذب اشباع‌پذیر در لیزرهای حالت جامد قفل‌شده مد مشکل‌تر است و کنترل اتلاف‌های غیراشباع (در داخل کاواک لیزر) بسیار مهم و تعیین کننده است؛ زیرا بهره در لیزرهای حالت جامد کمتر است که از محدودیت در طول محیط بهره آنها (ماکزیمم چند سانتی‌متر) ناشی می شود[9]. روش‌های مختلفی مانند لایه‌نشانی چرخشی[10]، لایه‌نشانی افشانه‌ای[11] و تبخیر عمودی[12] در تولید جاذب‌های اشباع‌پذیر نانولوله کربنی تک دیواره استفاده می‌شوندما در این مقاله به بررسی ساخت جاذب اشباع پذیر از نانولوله های کربنی به روش تبخیر عمودی می پردازیم.

۲- روش ساخت

از آنجایی که لیزر مورد استفاده در این مقاله لیزر Nd:YAG با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر است بنابراین می بایست از نانولوله‌های کربنی نیمه رسانا برای تهیه جاذب اشباع پذیر استفاده کرد؛ زیرا اغلب نانولوله های کربنی نیمه رسانا دارای پیک‌های جذبی در محدوده ۳۵۰ نانومتر تا ۱۶۰۰ نانومتر هستند. نانولوله های کربنی تک دیواره استفاده شده در این مقاله به روش قوس الکتریکیرشد داده شده و دارای قطر تقریبی ۵ نانومتر و توزیع طولی ۱۰ میکرومتر می باشندبرای تهیه محلول مورد نظر ابتدا چند میلی گرم از پودر نانولوله کربنی مورد نظر را در ۱۰ میلی‌لیتر محلول آبکی SDS با غلظت $\frac{w}{v}$٪۰٫۱ریخته می‌شود. در اینجا SDS یک فعال کننده سطحی است[13]. برای بدست آوردن جذب بالا در مخلوط معلق آبکی نانولوله‌های کربنی، مخلوط به مدت ۸ الی ۱۰ ساعت توسط امواج فراصوتی تکان داده می‌شود. پس از فرایند به‌هم زدن فراصوتی، محلول حاوی نانولوله‌های کربنی تک دیواره در سانتری‌فیوژ قرار می‌گیرد. در این مرحله توده‌های بزرگ نانولوله کربنی جداسازی و حذف می‌شوند. سپس مخلوط معلق از نانولوله های کربنی درون قالب مکعب شکلپلی استیرن (متناسب با اندازه بستر) ریخته می‌شود. بستر آب دوست به صورت عمودی در قطر مکعب قرار گرفته و نانو ذرات با تبخیر تدریجی بطور یکنواخت بر روی دو طرف بستر نشانده می شوند (شکل ۱). سپس قالب را درون دسیکاتور قرار می دهیم تا ذرات نانولوله کربنی معلق در محلول به تدریج بر روی بستر نشانده شوند. جهتنشت گرمایی موثر و اجتناب ازصدمه گرمایی موضعی جاذب تحت چگالی توان بالای لیزر، بهتر است لایه نشانی بر روی بستر کوارتز انجام می شود[14]؛ از طرفی تهیه بسترهای کوارتز بسیار هزینه بر بوده و در اینجا با توجه به خواص مشابه کوارتز و bk7، از bk7 به عنوان بستر استفاده شده است.

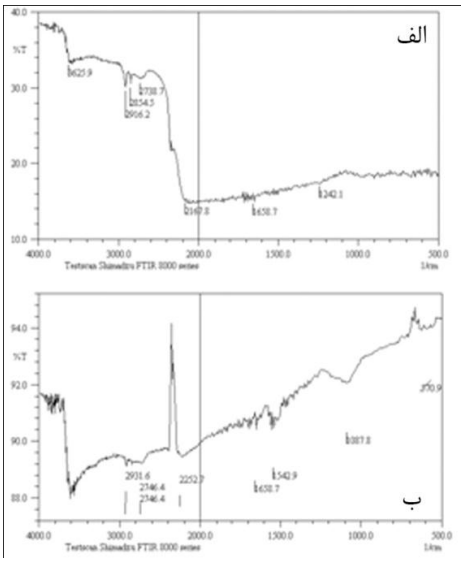
[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-20]



شکل ۱. نمایش طرح وار روش تبخیر عمودی.

۳- نتایج بدست آمده از آزمایش

پس از خشک شدن نمونه ها مشاهده شد که برخی از آنها لایه نشانی نشده و ذرات نانولوله کربنی بر کف قالب رسوب کرده اند و این درحالی بود که همه بسترهای bk7تحت شرایط یکسان لایه نشانی آب دوست شده اند. بررسی طیف تبدیل فوریه مادون قرمز (FT-IR) دو نمونه لایه نشانی شده و لایه نشانی نشده نتایج قابل توجهی را ارائه می دهند (شکل ۲). همان طور که مشاهده می شود، در ناحیه کمتر از عدد موج حدود ۲۰۰۰، میزان عبور کمتر از ۱۵ درصد است؛ در حالی که در طی فرایند فعال سازی به روش های مختلف از جمله تابش امواج ماورائ بنفش با شدت نسبتاً بالا (حدود ۱۰۰۰ وات) میزان عبور تا حدود ۸۵ درصد افزایش می یابد.



شکل ۲. نتایج حاصل از طیف سنجی FT-IR. (الف) نمونهلایه نشانی نشده. (ب) نمونه لایه نشانی شده.

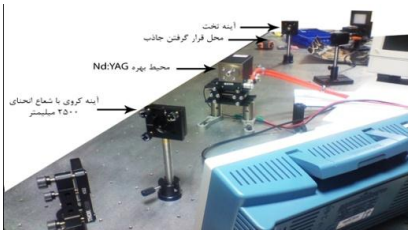
نتایج ناشی از این مطالعه نشان می دهد که:

۱) در طی فرایند فعال سازی تحت تابش امواج ماوراء بنفش، باند کربن-کربن شکسته شده و گروههای عاملی نظیر هیدروکسیل $(O\text{-}H)$و کربوکسید اسید $(COOH)$ ایجاد می گردد، وجود باند جذبی در حدود $۳۲۰۰\,cm^{-1}$ و $۱۶۵۸\,cm^{-1}$دال بر این فرایند است.

۲) در طی فعال‌سازی، فرایند قرار گرفتن بر روی بستر به روش‌های فیزیکی و شیمیایی انجام می گردد، به طوری که باعث یکنواختی فرایند اصلاح سطح می گردد.

۳) افزایش درصد عبور نشان دهنده کاهش پخش شدن نور توسط دسته‌ای از نانولوله های کربنی چسبیده بههم بر روی سطح نمونه است، به نحوی که انتظار می رود این فرایند (پراکندگی نور) نقش چشمگیری در عملکرد جاذب داشته باشدبه علاوه پراکندگی نور از سطح نمونه نشان دهنده حضور آب در آن و خشک نشدن نمونه می‌باشد.

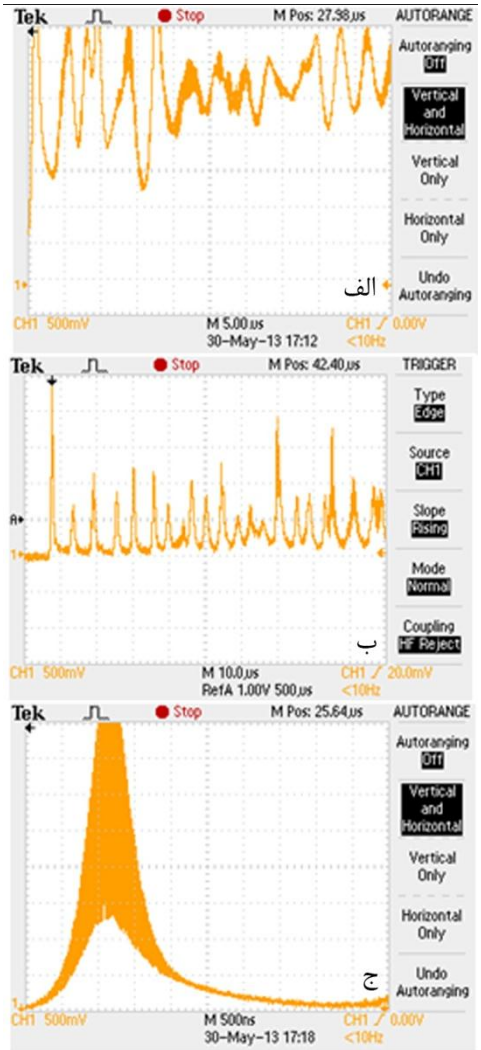
در این مقاله سه بستر را فعال کرده و با غلظت های ۱/۲، ۳ و ۵میلی‌گرم از نانولوله کربنی لایه نشانی کرده ایم. پس از خشک شدن، نمونه ها را به عنوان جاذب اشباع پذیر درون کاواک لیزر حالت جامد Nd:YAG در طول موج ۱۰۶۴ نانومتر قرار دادیم. شکل ۴ نتایج پالس خروجی به دست آمدهاز اسیلوسکوپ $(TDS\ ۵۰۵۴)$ Tektronix قبل و بعد از قرار دادن نمونه جاذب اشباع پذیر دومو شکل ۳شمایی از چیدمان کاواک و محل قرار گرفتن جاذب درون آن را نشان می‌دهد. نمونه اول بسیار شفاف بوده و با قرار گرفتن در کاواک تنها اتلاف ایجاد کرده و توان خروجی لیزر را کاهش می دهد و تغییری در شکل پالس خروجی ایجاد نمی کند. نمونه سوم نیز بسیار غلیظ بوده، اتلاف درون کاواک را زیاد و لیزر را متوقف می کند.



شکل ۳. چیدمان آزمایشگاهی کاواک لیزری.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-20]

شکل ۴ قطار پالس خروجی نمونه دوم را در مقیاس زمانی ۵ میکرو ثانیه و ۵۰۰ نانوثانیه نشان می دهد. مشاهده می‌شود که با قرار دادن جاذب درون کاواک، پالس‌های خروجی بر روی اسیلوسکوپ تلاش می‌کنند تا نظم بیشتری در پالس‌های خروجی لیزر ایجاد کنند. برای مشاهده جزییات بهتری از هریک از پالس های قطار و رسیدن به نتایج بهتر نیاز به یک اسیلوسکوپ با توان تفکیک بالاتر در حد یک نانوثانیه می باشدنتایج نشان می دهند که جهت رسیدن به قفل شدگی مد و ایجاد پالس های کوتاه بایستی ضخامت و یکنواختی سطح را بهینه کنیم و تا جای ممکن اتلاف های غیر اشباعی درون کاواک را کاهش دهیم.



شکل ۴. خروجی اسیلوسکوپ برای نمونه دوم. (الف) بدون جاذب. (ب) و(ج) با جاذب. با قرار دادن جاذب ایجاد نظم بیشتر مشاهده می شود.

مراجع

[1] U. Keller, *Applied Physics B*, vol. 15, p. 100, 2010.

[2] U. Keller, *Ultrafast Solid-State Lasers*, 2004.

[3] S. A. Zolotovskaya, et al., *Optical Materials*, vol. 28, p. 919, 2006.

[4] N. Sarukura, Y. Ishida, H. Nakano, and Y. Yamamoto, *Applied Physics Letters*, vol. 56, p. 814, 1990.

[5] R. Paschotta, *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*. Wiley VCH, 2008.

[6] Z. Sun, et al., *Applied Physics Letters* , vol. 95, p. 253102, 2009.

[7] S. Y. Set, C. S. Goh, D. Wang, H. Yaguchi, and S. Yamashita, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 47, p. 6809, 2008.

[8] Z. Sun, T.Hasan, and A.C.Ferrari, "Ultrafast lasers mode-locked by nanotubes and grapheme," *Physica E*, vol. 44, p. 1082–1091, 2012.

[9] W. B. Cho, et al., *Advanced Functional Materials*, vol. 20, p. 1937, 2010.

[10] W. B. C. S. L. Y. H. A. K. K. J. H. Yim, *Appl. Phys. Lett.*, no. 93, p. 161106, 2008.

[11] Y. W. Song, S. Yamashita, and C. S. Goh, *Opt. Lett.*, no. 32, p. 430, 2007.

[12] Y. G. Wang and X. Y. Ma, "Single Wall Carbon Nanotube Absorber with Polarization Absorption Grown by Vertical Evaporation Method," *Laser Physics*, vol. 21, p. 148–152, 2011.

[13] Y. G. W. a. X. Y. Ma, "Single Wall Carbon Nanotube Absorber with Polarization Absorption Grown by Vertical Evaporation Method," *Laser Physics*, vol. 21, p. 148–152, 2011.

[14] S. V. Garnov and e. al, "Passive mode-locking with carbon nanotube saturable absorber in Nd:GdVO4 and Nd:Y0.9Gd0.1VO4 lasers operating at 1.34µm," *Laser Phys. Lett.*, vol. 4, p. 648–651, 2007.

[15] B. Y. Zhang, G. Li, M. Chen, Z. G. Zhang, and Y. G. Wang, *Opt. Lett.*, no. 28, p. 1829, 2003.

[16] L. Sun, et al., *Laser. Phys. Lett.*, no. 7, p. 711, 2010.

[17] Z. H. Cong, et al., *Laser. Phys. Lett.*, no. 8, p. 107, 2011.

[18] Y. W. Song, S. Yamashita, C. S. Goh, and S. Y. Set, *Opt. Lett.*, vol. 32, p. 430, 2007.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-20]