



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 مد Nd:YAG

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

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

چکیده - امروزه جاذب‌های اشباع پذیر 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 میدهم. بررسی شکل پالس‌های خروجی اندازه‌گیری شده نوید دست‌یابی به پالس‌های بسیار کوتاه حاصل از فرآیند قفل‌شدگی مد را میدهد چنانچه موفق به تهیه نمونه‌های عاری از گرد و غبار و تجمع دسته جمعی نانولوله‌ها 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 Eskandari¹, Mahmood Hosseini Farzad¹, Mohammad Mahdi Doroodmand², Mahdi Moosavi³

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

Abstract- Nowadays single-wall carbon nano-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

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 قفل شده مد و از جمله آینه‌های جذب 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 گشاده است. با این وجود، فناوری قفل‌شدگی مد در لیزرها با مشکلاتی نیز روبروست. 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 کواک لیزر حساس هستند [2]. تحقیق بر روی مواد جذب اشباع‌پذیر جایگزین و جدید برای لیزرهای قفل‌شده مد غیرفعال در چند دهه اخیر افزایش یافته است [3]. جذب‌های اشباع‌پذیر قدیمی مانند رنگ‌های ارغوانی [4] و بلورهای تریق شده با یون [3] محدودیت‌های جدی در پایداری و عملکرد (زمان پاسخ‌دهی، محدوده طول موجی باریک پاسخ‌دهی) و هزینه بالای تولید دارند [1]. در مقابل نانولوله‌های کربنی تک دیواره (SWCNT) به عنوان مواد جذب اشباع‌پذیر جدید و جایگزین، عملکرد با کیفیت‌تری را فراهم می‌کنند. زمان بازایی در این نوع جذب‌ها در حد پیکوثانیه و پایداری شیمیایی، مکانیکی و محیطی آنها بالاتر است. لیزرهای قفل‌شده مد با جذب SWCNT در مواردی مانند اندازه‌گیری‌های صنعتی، نمونه‌برداری اپتیکی و اندازه‌گیری فرکانس نوری مورد استفاده قرار می‌گیرند [5,6,7]. جذب‌های اشباع‌پذیر نانولوله کربنی تک دیواره به طور موفقیت آمیزی در لیزرهای گوناگون مانند لیزرهای حالت جامد فیبر و نیمه-رسا به کار رفته‌اند [8]. در مقایسه با لیزرهای فیبر، بهینه‌سازی جذب اشباع‌پذیر در لیزرهای حالت جامد قفل‌شده مد مشکل‌تر است و کنترل اتلاف‌های غیراشباع (در داخل کواک 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 می‌شود [9]. روش‌های مختلفی مانند لایه‌نشانی چرخشی [10]، لایه‌نشانی افشایی [11] و تبخیر عمودی [12] در تولید جذب‌های اشباع‌پذیر نانولوله کربنی تک دیواره استفاده

می‌شوند. در این مقاله به بررسی ساخت جذب اشباع‌پذیر از نانولوله‌های کربنی به روش تبخیر عمودی می‌پردازیم.

۲- روش ساخت

از آنجایی که لیزر مورد استفاده در این مقاله لیزر Nd:YAG با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر است بنابراین می‌بایست از نانولوله‌های کربنی نیمه رسا برای تهیه جذب اشباع‌پذیر استفاده کرد؛ زیرا اغلب نانولوله‌های کربنی نیمه رسا دارای پیک‌های جزیی در محدوده ۳۵۰ نانومتر تا ۱۶۰۰ نانومتر هستند. نانولوله‌های کربنی تک دیواره استفاده شده در این مقاله به روش قوس الکتریکی‌شد داده شده و دارای قطر تقریبی ۵ نانومتر و توزیع طولی ۱۰ میکرومتر می‌باشند. برای تهیه محلول مورد نظر ابتدا چند میلی گرم از پودر نانولوله کربنی مورد نظر را در ۱۰ میلی‌لیتر محلول آبکی SDS با غلظت $0.1\% \text{ w/v}$ ریخته 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 به هم 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 نانولوله‌های کربنی درون قالب مکعب شکلی استیرن (متناسب با اندازه بستر) ریخته می‌شود. بستر آب دوست به صورت عمودی در قطر مکعب قرار گرفته و نلواترات با تبخیر تدریجی بطور یکنواخت بر روی دو طرف بستر نشاند می‌شوند (شکل ۱). سپس قالب را درون دسیکاتور قرار می‌دهیم تا ذرات نانولوله کربنی معلق در محلول به تدریج بر روی بستر نشاند شوند. جهت‌نشست گرمایی موثر و اجتناب از صدمه گرمایی موضعی جذب تحت چگالی توان بالای لیزر، بهتر است لایه نشانی بر روی بستر کوارتز انجام می‌شود [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.

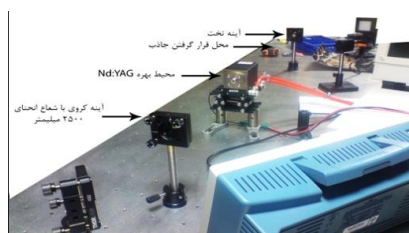
نتایج ناشی از این مطالعه نشان می دهد که:

(۱) در طی فرایند فعال سازی تحت تابش امواج ملوارا بنفش، باند کربن-کربن شکسته شده و گروه های عملی نظیر هیدروکسیل (O-H) و کربوکسید اسید (COOH) ایجاد می گردد، وجود باند جنبی در حدود 3200 cm^{-1} و 1658 cm^{-1} دال بر این فرایند است.

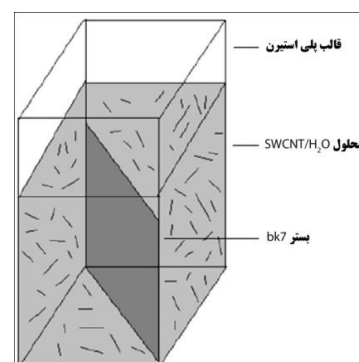
(۲) در طی فعال سازی، فرایند قرار گرفتن بر روی بستر به روش های فیزیکی و شیمیایی انجام می گردد به طوری که باعث یکنواختی فرایند اصلاح سطح می گردد.

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

در این مقاله سه بستر را فعال کرده و با غلظت های ۱/۲، ۳ و ۵ میلی گرم از نانولوله کربنی لایه نشانی کرده ایم پس از خشک شدن، نمونه ها را به عنوان جاذب اشباع پذیر درون کواک لیزر حالت جامد Nd:YAG در طول موج ۱۰۶۴ نانومتر قرار دادیم شکل ۴ نتایج پالس خروجی به دست آمده از اسیلوسکوپ (TDS ۵۰۵۴) Tektronix قبل و بعد از قرار دادن نمونه جاذب اشباع پذیر دموو شکل ۳ آشنایی از چیدمان کواک و محل قرار گرفتن جاذب درون آن را نشان می دهد. نمونه اول بسیار شفاف بوده و با قرار گرفتن در کواک 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 کواک را زیاد و لیزر را متوقف می کند.



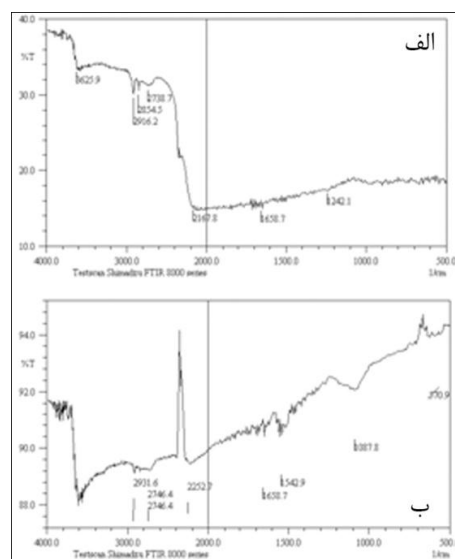
شکل ۳. چیدمان آزمایشگاهی کواک لیزری.



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 در حالی بود که همه بسترهای bk7 تحت شرایط یکسان لایه نشانی آب دوست شده اند بررسی طیف تبدیل فوریبه 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 ملوارا بنفش با شدت نسبتاً بالا (حدود ۱۰۰۰ وات) میزان عبور تا حدود ۸۵ درصد افزایش می یابد.

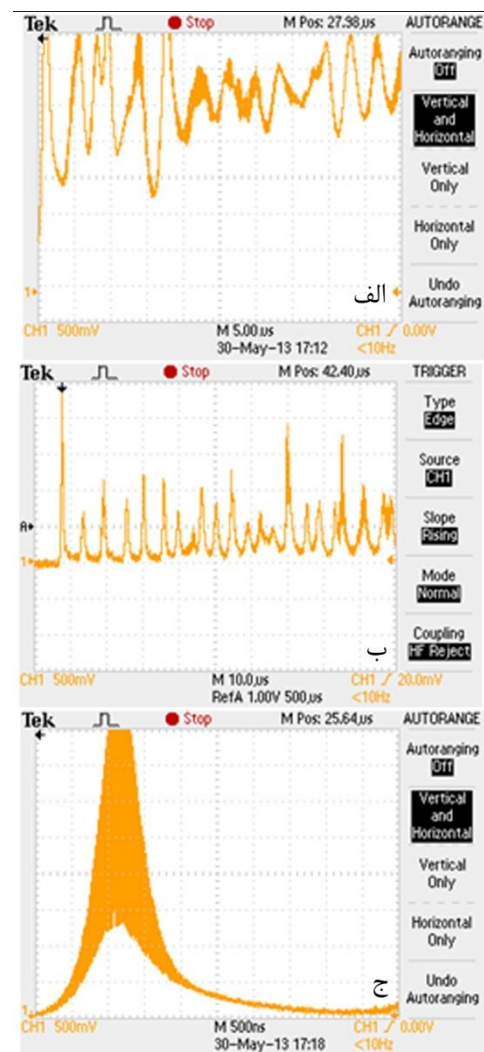


شکل ۲. نتایج حاصل از طیف سنجی FT-IR. (الف) نمونه لایه نشانی نشده. (ب) نمونه لایه نشانی شده.

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:Y_{0.9}Gd_{0.1}VO₄ lasers operating at 1.34 μ m," *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.

شکل ۴ قطار پالس خروجی نمونه دوم را در مقیاس زمانی ۵ میکروثانیه و ۵۰۰ نانوثانیه نشان می دهد مشاهده می شود که با قرار دادن جاذب درون کواک پالس های خروجی بر روی اسیلوسکوپ تلاش می کنند تا نظم بیشتری در پالس های خروجی لیزر ایجاد کنند برای مشاهده جزئیات 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 باشند نتایج 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 اشیاعی درون کواک 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.