بیست و هشتمین کنفرانس
اپتیک و فوتونیک ایران و
چهاردهمین کنفرانس مهندسی و
فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

# اثر شدت باریکه لیزر بر خواص اپتیک غیرخطی لایه نازک اکسید ایندیوم- قلع (ITO)

علی علی‌زاده سنگلی؛ یاسر رجبی؛ محمد مهدی باقری محققی
دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان، دامغان

در این مقاله لایه‌های نازک اکسید ایندیوم- قلع (ITO) بر روی بسترهای شیشه‌ای به روش اسپری پایرولیزیز لایه نشانی شده است. خواص اپتیکی و ساختاری لایه‌ها با نتایج حاصل از پراش پرتو X (XRD)، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) و طیف سنجی UV-Vis مطالعه شد. سپس با استفاده از چیدمان جاروب Z نمونه، پارامترهای اپتیک غیرخطی لایه‌ها از جمله ضریب جذب و ضریب شکست غیرخطی محاسبه شد. این بررسی در چهار شدت اولیه پرتو لیزر $\left(\frac{W}{m^2}\right)$ ۲٫۷×۱۰$^{۹}$، $\left(\frac{W}{m^2}\right)$ ۹٫۴×۱۰$^{۸}$، $\left(\frac{W}{m^2}\right)$ ۲٫۸×۱۰$^{۸}$ و $\left(\frac{W}{m^2}\right)$ ۹٫۹×۱۰$^{۷}$ انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که خواص اپتیک غیرخطی لایه نازک ITO لایه نشانی شده، با تغییر شدت فرودی لیزر تغییر می‌کند.

کلیدواژه‌ها: اکسید ایندیوم-قلع (ITO)، اپتیک غیرخطی، ضریب جذب غیرخطی، ضریب شکست غیرخطی، توان لیزر.

# The effects of initial laser intensity on the nonlinear optical properties of the ITO thin films

**Alizadeh Sangli, Ali; Rajabi, Yasser; Bagheri Mohagheghi, Mohammad Mehdi**
**School of Physics, Damghan University, Damghan 36716-41167, Iran.**

**In this paper, Indium-Tin Oxide (ITO) thin films were deposited by spray pyrolysis. Then, optical and structural properties of thin films were studied by X-ray diffraction (XRD), field emission scanning electron microscopy (FESEM) images, and UV-Vis spectroscopy. Also, nonlinear optical parameters (such as nonlinear refractive index and nonlinear absorption coefficient) were determined. The samples were placed in the Z-Scan setup. In this paper is used of four initial intensities, $2.7\times10^{9}$ W/m$^2$, $0.938\times10^{9}$ W/m$^2$, $0.28\times10^{9}$ W/m$^2$ and $0.098\times10^{9}$ W/m$^2$. The results showed that the nonlinear optical properties of ITO were changed with initial laser intensity.**

Keywords: Indium Thin Oxide (ITO), Nonlinear optics, Nonlinear refractive index, Nonlinear absorption coefficient, Laser intensity.

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06 ]

## مقدمه

امروزه با وجود گذشت چند دهه از مشاهده پدیده اپتیک غیرخطی، همچنان این پدیده مورد علاقه بسیاری از محققین است [۱]. در سال‌های اخیر این پدیده کاربردهای گسترده‌ای از جمله ارتباطات نوری، تحلیل اطلاعات، ذخیره‌سازی اطلاعات، پردازش اطلاعات کوانتومی، ساخت لیزرها ، ساخت و ارتقاء لوازم اپتیک پیشرفته داشته است[۲, ۳].

امروزه یکی از چالش‌های پیش روی محققین ساخت موادی با ویژگی‌های اپتیک غیرخطی بالا است. اخیرا محققین نشان داده‌اند که رفتار اپتیک غیرخطی مواد با ثابت دی‌الکتریک نزدیک به صفر بطور چشم‌گیری بهبود می‌یابد. نتایج نشان داده است که لایه‌های نازک اکسید رسانای شفاف Transparent Conductive Oxides (TCO) دارای پاسخ غیرخطی بزرگی در ناحیه نور مرئی هستند [۴]. یکی از لایه‌های نازک اکسید رسانای شفاف، لایه نازک اکسید ایندیوم-قلع است.

در این مقاله رفتار اپتیک غیرخطی لایه نازک شفاف اکسید ایندیوم-قلع با استفاده از چیدمان جاروب Z نمونه مورد بررسی قرار گرفت.

## مشخصات ساختاری اکسید ایندیوم-قلع

اکسید ایندیوم-قلع (ITO) یک نیمرسانای شفاف نوع n بوده که دارای انرژی گاف نواری در حدود ۴ الکترون ولت است. همچنین این ماده مقاومت ویژه کمی (حدود $10^{-4}\Omega$ .cm) دارد و شفافیتی در حدود ۸۵-۹۰ درصد دارد. اگر به شبکه اکسید ایندیوم، مقدار جزئی ناخالصی قلع اضافه شود، شبکه بلوری به دست آمده ITO است.

ساختار شبکه اکسید ایندیوم-قلع معمولا به صورت مکعبی، رومبوهدرال و هگزاگونال رشد داده می‌شود که با تغییر نسبت‌های استفاده شده از ایندیوم، قلع و اکسیژن قابل تغییر هستند. جهت‌گیری ارجح ساختار بلوری ITO طبق مقالات بین المللی، جهت گیری‌های صفحات با شاخص‌های میلر ۲۲۲ و ۴۰۰ هستند[۵].

## لایه نشانی و مشخصه‌یابی ساختاری و اپتیک خطی

برای لایه‌نشانی اکسید ایندیوم-قلع روش‌های متعددی وجود دارد که در این پژوهش به علت شفافیت و رسانایی بالای لایه‌ها، از روش اسپری پایرولیزیز استفاده شده است. لایه‌ها با ضخامت متفاوت و غلظت مختلف نسبت قلع به ایندیوم (Sn/In) تهیه شده تا رفتار اپتیک غیرخطی نمونه‌ها در شرایط مختلف بررسی شود (جدول ۱).

در این پژوهش یک نمونه در آزمایشگاه ساخته شد که با توجه به الگوی پراش پرتو X دارای خواص ساختاری یکسان با نمونه مرجع[۶] (که با اسپری پایرولیزیز لایه نشانی شده) است. همچنین برای مشخصه‌یابی اپتیک خطی مانند مقدار جذب خطی، مقادیر عبور و بازتاب لایه‌ها، از مشخصه‌یابی طیف نور مرئی UV-Vis استفاده شد (شکل ۲).

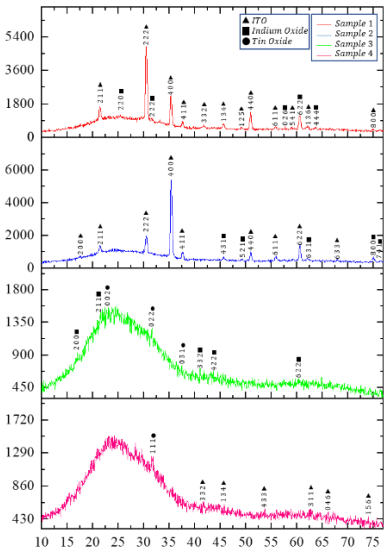
برای مشخصه یابی ریختار و ضخامت لایه‌ها از تصویر برداری الکترونی FESEM استفاده شده که دقت بالایی در تعیین ضخامت نمونه‌ها داشته است.

## اندازه‌گیری ضرایب اپتیک غیرخطی

بدلیل حساسیت بالای ضرایب اپتیک غیرخطی در نمونه‌های مورد بررسی، چیدمان آزمایش از دقت بالایی برخوردار است. برای بررسی رفتار اپتیک غیرخطی لایه‌های نازک ITO از چیدمان جاروب Z نمونه (Z-scan) استفاده شده است. چیدمان جاروب Z نمونه در آزمایشگاه لیزر دانشگاه دامغان بصورت کاملا اتوماتیک و با دقت بالایی داده‌برداری می‌کند. توسط این چیدمان تغییرات شدت پرتو لیزر بر حسب تغییرات نمونه حول نقطه کانونی پرتو لیزر،

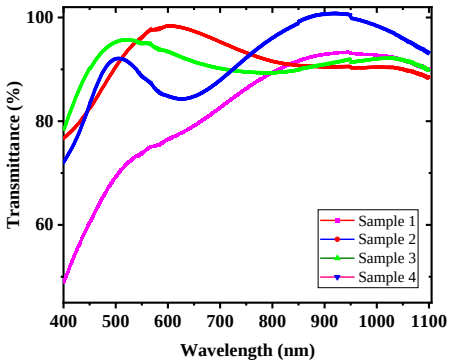
[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06 ]

اندازه‌گیری می‌شود. در این چیدمان از یک لیزر پالسی Nd:YAG هارمونیک دوم با طول موج ۵۳۲ نانو متر استفاده شده است.



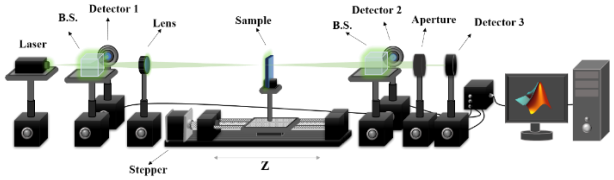

شکل ۱ : الگوی پراش پرتو X لایه‌های نازک تهیه شده از اکسید ایندیوم-قلع.

با استفاده از شدت ثبت شده توسط آشکارساز "دریچه باز" و "دریچه بسته" و رسم نمودار بهنجار شده تغییرات شدت بر حسب فاصله، به ترتیب می‌توان ضریب جذب و ضریب شکست غیرخطی را بدست آورد.




شکل ۲ : مقادیر عبور بدست لایه‌های نازک ITO تهیه شده در این پژوهش.

نموداری که از شدت ثبت شده توسط آشکارساز دریچه باز رسم می‌شود دارای یک قله یا دره (به ترتیب مقدار مثبت و منفی ضریب جذب غیرخطی) است که با استفاده از رابطه (۱)، مقدار این ضریب بدست می‌آید.




شکل ۳ : شماتیک چیدمان جاروب Z نمونه استفاده شده برای محاسبه ضرایب اپتیک غیرخطی نمونه

$$\beta = \frac{2^{3/2}[1 - T(0)]}{I(0)L_{eff}} \qquad (۱)$$

که در آن $L_{eff} = (1\text{-}e^{\alpha L}) / \alpha$ برابر با طول موثر، I(0) شدت اولیه پرتو لیزر و T(0) فاصله نقطه کمینه یا بیشینه از قسمت خطی نمودار است. به صورت مشابه نموداری که توسط آشکار ساز دریچه بسته رسم می‌شود، دارای یک قله به همراه یک دره بوده که ترتیب قرارگیری نقاط بیشینه و کمینه، علامت ضریب شکست غیرخطی و فاصله قله تا دره بعد از جایگذاری در رابطه (۲) مقدار این ضریب را مشخص می‌کند.

$$\Delta n = \frac{\Delta T_{p-v}}{0.406(1 - S)^{1/4} k I(0) L_{eff}} \qquad (۲)$$

که در آن $\Delta T_{p-v}$ فاصله نقطه بیشینه و کمینه، S شعاع روزنه و k عدد موج است[۸و۹]. در این پژوهش، ضرایب اپتیک غیرخطی در چهار شدت اولیه لیزر اندازه‌گیری شده است که در شکل (۳) یکی از نمودارهای مربوط به نمونه‌ها قابل مشاهده است. از دو فرمول اخیر مشخص است که ضرایب اپتیک غیرخطی صراحتا به شدت اولیه لیزر وابسته هستند.

## نتیجه‌گیری

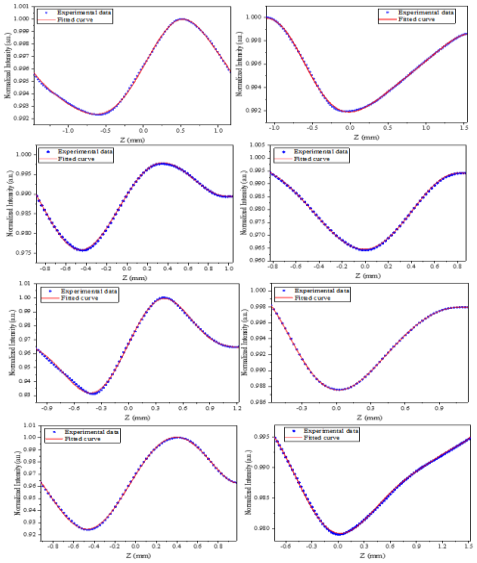
نتایج مهم بدست آمده از پراش پرتو X و آزمایش های اپتیکی لایه ها بشرح زیر می باشد:

الف) نمونه‌های ۱ و ۲ که دارای نسبت غلظت قلع به ایندیوم مطابق نمونه مرجع هستند، دارای ساختار شبکه‌ای

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06 ]

بلوری و مناسب‌تری هستند. در نمونه‌های ۳ و ۴ تغییر در نسبت غلظت قلع به ایندیوم منجر به تشکیل ساختار بی‌شکل شده است.

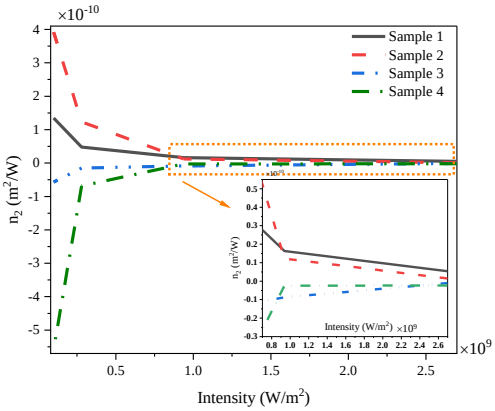
ب) نوع ساختار بر روی خواص جذب اپتیکی غیر خطی اثر بسیار مهمی دارد. با مقایسه ضرایب اپتیک غیرخطی نمونه‌ها این احتمال بوجود می‌آید که، ساختارهای آمورف دارای ضریب شکست غیرخطی منفی بوده و ساختارهای بلوری رشد یافته شده از اکسید ایندیوم-قلع دارای ضریب شکست غیرخطی مثبت هستند.



شکل ۴ : نتایج حاصل از چیدمان جاروب Z نمونه دوم. توان پرتو فرودی، به ترتیب از بالا ۱۶۴، ۵۷، ۱۷ و ۶ میلی وات است.

جدول ۱: خلاصه نتایج تجربی بدست آمده در این پژوهش

| | | نمونه ۱ | نمونه ۲ | نمونه ۳ | نمونه ۴ |
|---|---|---|---|---|---|
| نسبت غلظت قلع به ایندیوم [Sn/In] | | ۰/۰۱۸ | ۰/۰۱۸ | ۰/۰۰۹۲۷ | ۰/۰۳۷۱ |
| نسبت اتمی قلع به ایندیوم [Sn/In] | | ۰,۱۱ | ۰,۱۲ | ۰,۲۶ | ۰,۲۱ |
| ضخامت (nm) | | ~۱۰۰۰ | ~۴۲۰ | ~۳۹۰ | ~۳۸۸ |
| ضریب شکست غیرخطی $n_2 \left(\frac{m^2}{W}\right) \times 10^{-10}$ | $I_0 = 2.7 \left(\frac{W}{m^2}\right) \times 10^9$ | ۰,۰۵۳ | ۰,۰۱۴۶ | -۰,۰۱ | -۰,۰۲ |
| | $I_0 = 0.938 \left(\frac{W}{m^2}\right) \times 10^9$ | ۰,۱۶۴ | ۰,۱۲۲ | -۰,۰۸۷۵ | -۰,۰۴۷ |
| | $I_0 = 0.28 \left(\frac{W}{m^2}\right) \times 10^9$ | ۰,۴۷۸ | ۱,۲۳ | -۰,۱۴۷ | -۰,۶۸۶ |
| | $I_0 = 0.098 \left(\frac{W}{m^2}\right) \times 10^9$ | ۱,۳۵ | ۳,۹۲ | -۰,۵۷۱ | -۵,۵۸ |
| ضریب جذب غیرخطی $\beta \left(\frac{m}{W}\right) \times 10^{-3}$ | $I_0 = 2.7 \left(\frac{W}{m^2}\right) \times 10^9$ | ۰,۰۳۷۲ | ۰,۰۱۱۷ | ۰,۰۲۳۱ | ۰,۰۱ |
| | $I_0 = 0.938 \left(\frac{W}{m^2}\right) \times 10^9$ | ۰,۱۳۶ | ۳,۷۳ | ۰,۰۳۴۶ | ۰,۰۶۱ |
| | $I_0 = 0.28 \left(\frac{W}{m^2}\right) \times 10^9$ | ۳,۸۴ | ۰,۱۷۲ | ۰,۱۰۳ | ۰,۵۲۵ |
| | $I_0 = 0.098 \left(\frac{W}{m^2}\right) \times 10^9$ | ۰,۷۷۵ | ۰,۸۱۴ | ۰,۱۷۷ | ۱,۵۹ |




شکل ۵ : نمودار تغییرات مقادیر ضریب شکست غیرخطی نمونه‌ها در شدت‌های مختلف پرتو لیزر

ج) به علت مثبت بودن ضریب جذب غیرخطی و تغییر نکردن علامت این ضریب در نمونه‌ها، جذب اشباع در نمونه‌ها دیده نمی‌شود.

د) با توجه به شکل (۴) و مقایسه مقادیر ضریب شکست غیرخطی نمونه‌ها می‌توان به این تحلیل دست یافت که با کاهش شدت اولیه پرتو لیزر شاهد افزایش ضریب شکست غیرخطی هستیم.

## مرجع‌ها

[1] E. Garmire, (2013). “Nonlinear optics in daily life,” *Opt. Express*, Vol. 21, No. 25, p. 30532.
[2] D. E. Chang, V. Vuletić, and M. D. Lukin, (2014). “Quantum nonlinear optics — photon by photon,” *Nat. Photonics*, Vol. 8, No. 9, pp. 685–694.
[3] O. Sakhno, P. Yezhov, V. Hryn, V. Rudenko, and T. Smirnova, (2020). “Optical and Nonlinear Properties of Photonic Polymer Nanocomposites and Holographic Gratings Modified with Noble Metal Nanoparticles,” *Polymers (Basel).*, Vol. 12, No. 2, p. 480.
[4] O. Reshef, I. De Leon, M. Z. Alam, and R. W. Boyd, (2019). “Nonlinear optical effects in epsilon-near-zero media,” *Nat. Rev. Mater.*, Vol. 4, No. 8, pp. 535–551.
[5] T. Maruyama and K. Fukui, (1991). “Indium-tin oxide thin films prepared by chemical vapor deposition,” *J. Appl. Phys.*, Vol. 70, No. 7, pp. 3848–3851.
[6] A. To, S. Energy, and O. Properties, (1979). “In203 : (Sn) A N D SnO2: (F) F I L M S - APPLICATION TO SOLAR ENERGY CONVERSION P A R T II - E L E C T R I C A L AND OPTICAL PROPERTIES,” Vol. 14, No. c, pp. 163–175.
[7] A. N. Gheymasi, Y. Rajabi, and E. N. Zare, (2020). “Nonlinear optical properties of poly(aniline-co-pyrrole)@ ZnO-based nanofluid,” *Opt. Mater. (Amst).*, Vol. 102.
[8] S. Dadkhah, Y. Rajabi, and E. N. Zare, (2021). “Thermal Lensing Effect in Laser Nanofluids Based on Poly (aniline-co-ortho phenylenediamine)@$$\text{TiO}_{2}$$ Interaction,” *J. Electron. Mater.*, Vol. 50, No. 8, pp. 4896–4907.



[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06 ]