# بررسی خواص نوری غیرخطی در نانوساختار دوبعدی $MoS_2$

**افشین علی پور[۱]، صغری میرارشادی[۲]، سیده زهرا مرتضوی[۳]، فرهاد ستاری[۱]**

[۱] گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
[۲] گروه علوم مهندسی، دانشکده فناوری های نوین، دانشگاه محقق اردبیلی، نمین
[۳] گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

چکیده - در این مقاله، خواص اپتیکی غیرخطی نانو ساختار دوبعدی $MoS_2$ با به کارگیری روش جاروب–Z توسط لیزر پیوسته با توان‌های مختلف ۵۵ و ۱۲ میلی وات در طول موج ۵۳۲ نانومتر مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله این خواص اندازه و علامت ضریب شکست غیرخطی و ضریب جذب غیرخطی است که به کمک نمودارهای آزمایش جاروب-Z محاسبه شده است. همچنین پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم از مرتبه‌ی $10^{-7}$ (esu) تعین گردید. چنین خواص نوری مرتبه سوم بالا، این ساختار را کاندیدای مناسبی جهت بکارگیری در ادوات اپتوالکترونیکی و فوتوترانزیستورها معرفی می کند.

کلید واژه- روش جاروب-Z، خواص اپتیکی غیرخطی، $MoS_2$

# Investigation of Nonlinear Optical Properties in 2D $MoS_2$ Nanostructures

Afshin Alipour[1], Soghra Mirershadi[2], Seyedeh Zahra Mortazavi[3], Farhad Sattari[1]

[1]Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
[2] Department of Advanced Technologies, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
[3]Department of Physics, Faculty of Science, Imam Khomeini International University, Qazvin

Abstract- In this paper, the nonlinear optical properties of two-dimensional $MoS_2$ nanostructure are investigated using the Z-scan method by continuous wave lasers with 12 and 55 mW at 532 nm. The properties of the size and sign of the nonlinear refractive index and the nonlinear absorption coefficient are calculated using the Z-scan technique. The corresponding third-order susceptibilities is determined to be as large as $10^{-7}$ (esu) under laser excitation. This large third-order optical nonlinearity, makes this structure suitable for application of optoelectronic devices and phototransistors.

Keywords: Z-scan technique, Nonlinear optical properties, $MoS_2$

## ۱- مقدمه

طی دهه‌های اخیر، پژوهش‌های بسیاری به منظور دسترسی به موادی با خواص نوری غیر خطی بالا و زمان پاسخ کوتاه به سیگنال‌های نوری صورت گرفته است. یکی از ویژگی‌های مهم نانو ساختارها، خواص نوری غیر خطی آنهاست. پاسخ اپتیکی غیرخطی نانو ساختارها به باریکه پرشدت لیزر، امکان به کارگیری این مواد در ادوات اپتو الکترونیکی مانند دیودهای نور گسیل، سلول‌های خورشیدی و سویچ‌های اپتیکی را نوید می‌دهد. روش جاروب-Z، روشی بسیار ساده و در عین حال حساس برای اندازه گیری ضریب جذب غیر خطی و ضریب شکست



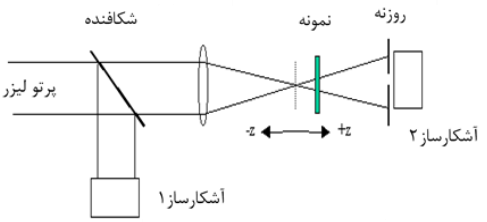
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

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

غیرخطی است. این روش اولین بار توسط شیخ بهایی و همکارانش در سال ۱۹۸۹ ابداع شده است و توجه پژوهشگران و محققان قرار گرفت [۱]. اخیرا ساختارهای دوبعدی مولیبدن دی سولفید ($MoS_2$) توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. این ساختارها با دارا بودن ویژگیهای منحصر به فرد مانند گاف انرژی تنظیم پذیر، تشکیل اکسایتون پایدار و انرژی پیوند اکسایتونی بالاتر در بسیاری از پژوهشها مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۴-۲]. اما در این پژوهش مطالعه برروی رفتار نوری غیر خطی $MOS_2$ به روش جاروب-Z انجام گرفته است.

## ۲- روش آزمایش

با توجه به اینکه امکان به کارگیری نانو ساختارهای دو بعدی مورد مطالعه در ادوات اپتو الکترونیکی پیشرفته، مستلزم شناخت پاسخ نوری غیرخطی آنها می‌باشد، به این خاطر هدف اصلی ما مطالعه بر روی عامل‌های بوجود آورنده‌ی رفتار نور غیر خطی در این ساختار ها است. در این آزمایش از لیزر پیوسته با توان‌های مختلف ۱۲ و ۵۵ میلی وات با طول موج ۵۳۲ نانومتر استفاده شده است. مطابق شکل (۱) باریکه لیزر پس از خارج شدن از دهانه لیزر توسط شکافنده به دو باریکه تقسیم میشود، شدت یکی از این باریکه ها به عنوان پرتو مرجع توسط اشکارساز ۱ ثبت می گردد و پرتو دیگر به یک عدسی با فاصله کانونی ۱۰۰ میلی‌متر می‌رسد، این پرتو به وسیله عدسی کانونی شده و از نمونه‌های آزمایش که حول کانون عدسی جابجا می‌شوند، عبور کرده و به آشکارساز ۲ می‌رسد.




شکل۱: چیدمان جاروب-Z

تحت این شرایط، تابندگی در محل کانون که از رابطه $I_0 = \frac{2P_{in}}{\pi\omega_{0f}^2}$ بدست می‌آید ($P_{in}$ توان ورودی و $\omega_{0f}$ شعاع باریکه در محل کانون است) که برای توان‌های مختلف ۱۲ و ۵۵ میلی وات، به ترتیب برابر $I_0 = 5.15\times10^2$ وات بر سانتی‌متر مربع و $I_0 = 2.26\times10^3$ وات بر سانتی‌متر مربع است. همچنین شعاع باریکه در محل کانون $\omega_{0f} = 39.3$ میکرومتر تعیین گردید. علاوه براین طول رایلی از رابطه $Z_0 = \frac{\pi\omega_{0f}^2}{\lambda}$ در حدود۹.۱ میلی‌متر بدست آمد که بسیار بیش‌تر از ضخامت نمونه نانو ساختار (۱۰۰ نانومتر) است. روش جاروب-Z از دو چیدمان تشکیل می‌شود: ۱- جاروبZ با دریچه بسته برای اندازه گیری ضریب شکست غیرخطی $n_2$. ۲- جاروب-Z با دریچه باز برای اندازه گیری ضریب جذب غیرخطی $\beta$ [۱].

تراگسیلندگی خطی و شعاع باریکه در روزنه با استفاده از روابط $\omega_a = \omega_{0f}\sqrt{1+z_a^2/z_0^2}$ و $S = 1-\exp(-2r_a^2/\omega_a^2)$ به دست می‌آیند که در آن $r_a$ شعاع روزنه و $z_a$ شعاع پرتو در محل روزنه است [۱]. تراگسیلندگی نور از میان روزنه-ای که در فاصله دور از کانون قرار گرفته است برابر S=0.54 تعین شد.

## ۳- بحث و بررسی

در این تحقیق خواص اپتیکی غیرخطی مرتبه سوم نانو ساختار دوبعدی $MoS_2$، از جمله ضریب شکست غیرخطی $n_2$، ضریب جذب غیرخطی $\beta$ و پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم $\chi^{(3)}$ مورد بررسی قرار گرفته است.

همچنین ضریب جذب خطی با استفاده از روش مرسوم آزمایشی تحت تابش با شدت های کم پرتو لیزر و در ناحیه خطی پاسخ ماده، توسط رابطه $\alpha_0 = \frac{-1}{l}\ln(\frac{I}{I_0})$ تعیین گردید. که در آن $I_0$ و $I$ به ترتیب بیانگر شدت نور تابشی و عبوری از نمونه و $l$ ضخامت آن است.

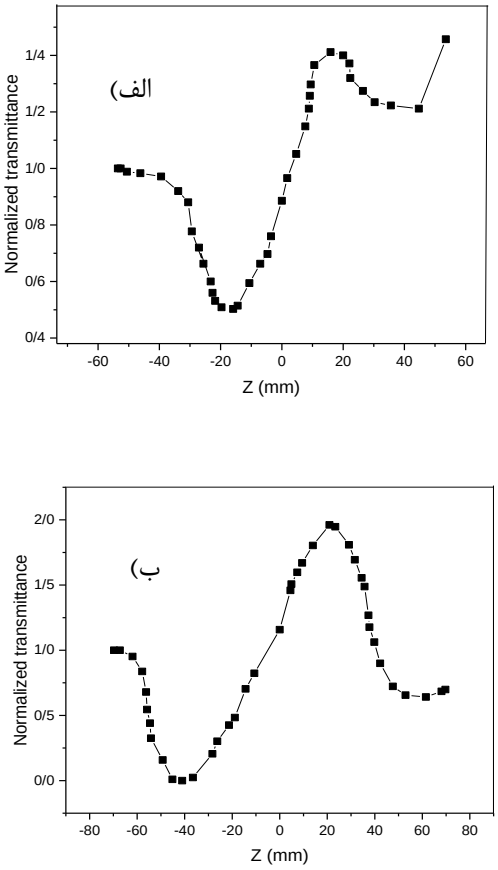


این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

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

همچنین طول موثر را می‌توان با استفاده از رابطه $L_{eff}=\frac{1-\exp(-\alpha_0 L)}{\alpha_0}$ بدست آورد [۵].

نمودار تراگسیلیدگی جاروب-Z با روزنه بسته برای نانو ساختار $MoS_2$ با دو توان‌های لیزر ۵۵ و ۱۲ میلی وات به ترتیب در شکل (۲) الف و ب آورده شده است.




شکل۲: منحنی تراگسیلیدگی جاروب-Z با روزنه بسته در نانو ساختار $MoS_2$ برای توان لیزر (الف): ۵۵ میلی وات و (ب): ۱۲ میلی‌وات.

کاهش شدت نور عبوری برای حالتی که نمونه قبل از کانون عدسی در حال حرکت است و افزایش شدت برای زمانی که نمونه مورد نظر بعداز کانون قرار دارد، بیانگر پدیده‌ی خودکانونی متناظر با رفتار غیرخطی مثبت است [۱].

با محاسبه تفاضل تراگسیلیدگی بهنجار بین قله و دره به صورت $\Delta T_{P-V}=T_P-T_V$ از منحنی برازش شده توسط معادله $T(z,\Delta\Phi_0)\approx 1-\frac{4x}{(x^2+9)(x^2+1)}\Delta\Phi_0$ می‌توان تغییر فاز روی محور در محل کانون ($|\Delta\Phi_0|$)، را توسط رابطه $\Delta T_{P-V}=0.406(1-S)^{0.27}|\Delta\Phi_0|$ بدست آورد. در ادامه با قرار دادن $\Delta\Phi_0$ در رابطه‌ی $|\Delta\Phi_0|=(\frac{2\pi}{\lambda})n_2 I_0 L_{eff}$ ضریب شکست غیرخطی $n_2$ را محاسبه نمود [۱]. نتایج حاصل از این محاسبات در جدول (۱) آورده شده است. همانطور که از جدول (۱) پیداست، نانو ساختار $MoS_2$ تحت هر دو شدت نور لیزر نمونه دارای ضریب شکست غیرخطی بالایی از مرتبه $10^{-7}$ است. همچنین نتایج حاکی از این می‌باشد که ضریب شکست غیرخطی، با کاهش شدت لیزر افزایش یافته است.

به منظور تعیین ضریب جذب غیرخطی، نانو ساختار $MoS_2$ از روش جاروب-z با روزنه باز استفاده شده است. منحنی‌های تراگسیلیدگی بهنجارشده جاروب-Z با روزنه باز برای دو توان مختلف ۵۵ و ۱۲ میلی‌وات در شکل (۳) الف و ب آورده شده است. با جابه جایی نمونه به طرف کانون یک کمینه‌ی در شدت تراگسیل با توان بالاتر لیزر (۵۵ میلی وات) مشاهده می‌شود که در شکل (۳) (الف) آورده شده و بیانگر این است که با افزایش شدت نور لیزر، ضریب جذب غیرخطی کاهش می‌یابد. این موضوع بدلیل رخ دادن پدیده جذب دو فوتونی ($\beta>0$) در این نوع نانو-ساختار است. همچنین مشاهده یک بیشینه در شدت تراگسیل با توان پایین‌تر لیزر (۱۲ میلی وات) بیانگر کاهش ضریب جذب با افزایش شدت نور می‌باشد که به دلیل پدیده جذب اشباع ($\beta<0$) است.

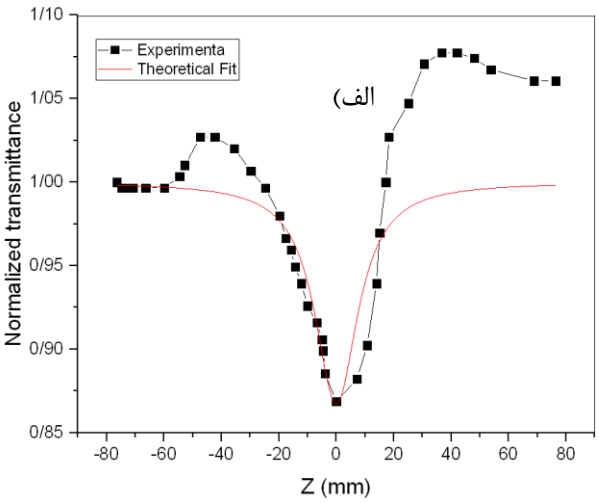
به وسیله برازش منحنی‌های حاصل از داده های تجربی با رابطه تقریبی $\Delta T(z)\approx\frac{q_0}{2\sqrt{2}}\left[1/(1+\frac{z^2}{z_0^2})\right]$ می توان مقدار ضریب $q_0$ را تعیین نمود و با معلوم بودن آن طبق رابطه‌ی $q_0=\beta I_0 L_{eff}$، می‌توان ضریب جذب اشباع $\beta$ را بدست آورد [۵]. نتایج حاصل از این محاسبات در جدول

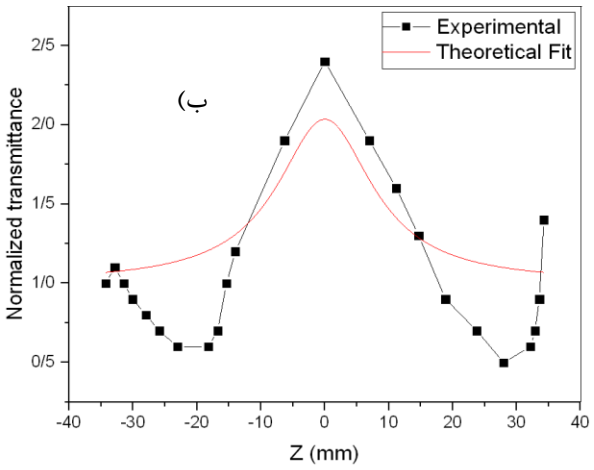


این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

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

(۱) آورده شده است. همچنین قسمت‌های حقیقی و موهومی پذیرفتاری غیر خطی تعیین گریید و نتایج حاصل از آن نیز در جدول (۱) آورده شده است.




شکل۳: منحنی تراگسیلیدگی جاروب-Z با روزنه باز در نانو ساختار $MoS_2$ برای توان لیزر (الف): ۵۵ میلی وات و (ب): ۱۲ میلی وات.

جدول (۱): محاسبات انجام شده آزمایش جاروب-Z

| $MoS_2$ sample | $\alpha_0$ ($cm^{-1}$) | $n_2$ ($cm^2/W$) | $\beta$ (cm/W) | $\chi^{(3)}$ ($m^2/v^2$) | Im $\chi^{(3)}$ (esu) | Re $\chi^{(3)}$ (esu) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $P_{in}$ =55 mW | $1.71\times10^{5}$ | $2.15\times10^{-7}$ | 34.2 | $1.89\times10^{-12}$ | $1.41\times10^{-8}$ | $9.5\times10^{-4}$ |
| $P_{in}$ =12 mW | $2.04\times10^{5}$ | $2.30\times10^{-6}$ | $-1.32\times10^{3}$ | $0.45\times10^{-13}$ | $1.51\times10^{-7}$ | $3.6\times10^{-2}$ |

## ۴- نتیجه گیری

در این مقاله ضریب شکست غیرخطی، ضریب جذب غیرخطی و پذیرفتاری مرتبه سوم نانو ساختار $MoS_2$ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که ضریب شکست غیرخطی، با کاهش شدت لیزر افزایش یافته است. همچنین با افزایش شدت لیزر در هر اتم با جذب همزمان دو فوتون گذاری از حالت پایه به برانگیخته اتفاق می‌افتد و پدیده جذب دو فوتونی با مشاهده یک دره در نمودار تایید می‌شود.

## مراجع

[۱] M. Sheik-bahae, A. A. Said, E. W. Van Stryland, "High-sensitivity, single-beam $n_2$ measurements", Opt. Lett., Vol. 14, pp. 955-957, 1989.
[۲] A. M-Sánchez, K. Hummer, L. Wirtz, "Vibrational and optical properties of $MoS_2$: From monolayer to bulks", Surface Science Reports, Vol. 70, pp. 554-586, 2015.
[۳] C. Yim, M. O'Brien, N. McEvoy, S. Winters, I. Mirza, J. G. Lunney, G. S. Duesberg, "Investigation of the optical properties of $MoS_2$ thin films using spectroscopic ellipsometry", Appl. Phys. Lett. Vol. 104, pp. 103114-103118, 2014.
[۴] R. Wang, H-C. Chien, J. Kumar, N. Kumar, H-Y. Chiu, H. Zhao "Third-Harmonic Generation in Ultrathin Films of MoS2", Appl. Mater. Interfaces, Vol. 6, pp. 314-318, 2014.
[۵] W. Van Stryland and M. Shei-Bahae, "Z-Scan, Characterization Tech-niques and Tabulations for Organic Nonlinear Optical Materials", M. G. Kuzyk and C. W. Dirk, Eds. New York: Marcel Dekker, 1998, pp. 655–692



این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

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