

تقویت جذب غیرخطی و محدودکنندگی نوری اکسید گرافن در مخلوط

شدن با نانوذرات Fe_2O_3

مسعود دهقانی پور، محمد خان زاده*، شبنم ابوطالبی

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران

تاریخ دریافت: 1395/10/17 ویرایش نهایی: 1396/12/11 تاریخ پذیرش: 1397/03/23

چکیده

در این پژوهش اکسیدگرافن (GO) با نانوذرات Fe_2O_3 به نسبت حجمی 1 به 10 با استفاده از التراسونیک پروبدار مخلوط شد. جذب غیرخطی GO، نانوذرات Fe_2O_3 و مخلوط $\text{GO-Fe}_2\text{O}_3$ با استفاده از تکنیک جاروب Z-روزنه باز مورد بررسی قرار گرفت. همچنین محدودکنندگی نوری این مواد بررسی شد. مشاهده شد که جذب غیرخطی و محدودکنندگی نوری اکسیدگرافن در اثر مخلوط شدن با نانوذرات Fe_2O_3 تقویت شده است. منبع نوری استفاده شده در تمامی آزمایشات یک دیود لیزر پیوسته با طول موج 532 نانومتر بود. در نانوذرات Fe_2O_3 با افزایش شدت فرودی به نمونه در منحنی جاروب Z-یک سوئیچ از حالت جذب اشباع به جذب اشباع معکوس مشاهده شد. در نمونه‌های GO و $\text{GO-Fe}_2\text{O}_3$ با افزایش شدت عمق دره در منحنی جاروب Z-افزایش پیدا کرد و ضریب جذب غیرخطی در آنها تا یک مقدار بهینه افزایش پیدا کرد. همچنین در نمونه $\text{GO-Fe}_2\text{O}_3$ مشاهده شد که با افزایش طول نمونه، قدرت محدودکنندگی این نمونه افزایش پیدا می‌کند.

کلیدواژگان: روش جاروب Z، مشتقات اکسیدگرافن، جذب دوفوتونی، جذب اشباع معکوس، جذب حامل‌های آزاد

ناشی از وجود مکانیسم پراکندگی غیرخطی علاوه بر جذب دو فوتونی در این ماده است. همچنین مشاهده شد که در غلظت‌های پایین توان محدودکنندگی این نمونه نسبت به فولرین نیز بیشتر است [7]. در مطالعه‌ای دیگر ژو و همکاران خواص نوری غیرخطی اکسیدگرافن عاملدار شده با فتالوسیانین روی (PcZn) را بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که جذب غیرخطی و پراکندگی غیرخطی GO در اثر ترکیب با PcZn افزایش پیدا کرده است. ژو بیان داشت که در GO برای طول موج 532 نانومتر تحت تابش نانوئانه محدودکنندگی نوری ناشی از مکانیسم‌های جذب دو فوتونی و پراکندگی غیرخطی است [8]. یامونا و همکاران جذب غیرخطی GO عامل‌دار شده با تترا-آمینو پورفیرین (TAP) را با استفاده از آزمایش

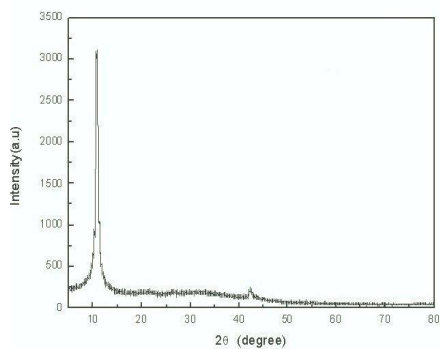
مقدمه

اکسیدگرافن به دلیل خواص نوری غیرخطی قابل توجه‌ای که از خود نشان داده است به عنوان یک ماده پرکاربرد در علم مواد تبدیل شده است [1-3]. محدودکنندگی نوری و استفاده از آن در لیزرهای Q-سوئیچ و Modelocked از جمله کاربردهای این ماده می‌باشد [3, 6]. مطالعات زیادی بر روی بررسی خواص نوری غیرخطی مشتقات اکسیدگرافن با استفاده از تکنیک جاروب Z-انجام شده است که در ادامه تعدادی از این مطالعات آورده می‌شود. خواص نوری غیرخطی اکسیدگرافن ترکیبی با نانوذرات Fe_3O_4 توسط ژنگ و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه، خواص نوری غیرخطی اکسیدگرافن (GO) در اثر ترکیب با نانوذرات Fe_3O_4 افزایش پیدا کرده است، که

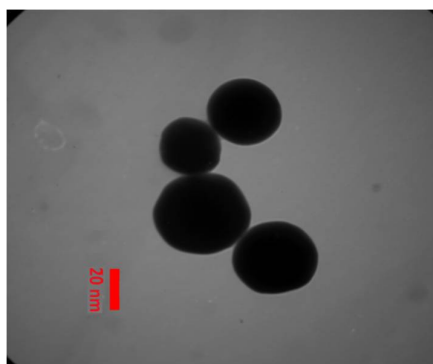
* نویسنده مسئول: mohammadkhanzadeh717@yahoo.com

40-20 نانومتر استفاده شد. در شکل 1 ب تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نانوذرات Fe_2O_3 آورده شده است. برای تهیه نمونه GO، مقدار 10 میلی گرم از پودر GO در 100 میلی لیتر اتانول ریخته شد و محلول حاصل به مدت 6 دقیقه به وسیله دستگاه تراسونیک پرویدار پراکنده شد. همچنین نمونه نانوذرات Fe_2O_3 به همین ترتیب تهیه شد. برای آماده سازی نمونه GO- Fe_2O_3 مقدار 2 میلی لیتر از نانوذرات Fe_2O_3 در 20 میلی لیتر GO ریخته شد و به مدت 6 دقیقه توسط تراسونیک پراکنده شد.

(الف)



(ب)



شکل 1. الف: پراش پرتوی ایکس اکسیدگرافن. ب: تصویر میکروسکوپ الکترون عبوری نانوذرات Fe_2O_3 .

شکل 2 طیف جذب محلول های GO، Fe_2O_3 و GO- Fe_2O_3 را نشان می دهد. با توجه به شکل قله های جذبی

جاروب-Z روزنه باز بررسی کردند و مشاهده کردند که جذب غیرخطی GO-TAP نسبت به GO در حدود 159% افزایش یافته است [9]. بیسواس و همکاران نشان دادند که خواص نوری غیرخطی GO در ترکیب با کامپوزیت نقره افزایش پیدا می کند. در این مطالعه فرآیند جذب حامل های آزاد (ESA) به همراه فرآیند جذب دو فوتونی (TPA) منجر افزایش خواص نوری غیرخطی GO در ترکیب با کامپوزیت نقره می شود [10]. در برخی مطالعات مشخص شد که تنها مخلوط کردن یک ماده که دارای خواص نوری غیرخطی است با GO سبب بهبود خواص نوری این ماده می شود [10 و 11].

در این مطالعه به منظور تقویت جذب غیرخطی و همچنین محدودکنندگی نوری اکسیدگرافن، این ماده با نانوذرات Fe_2O_3 با نسبت حجمی 1 به 10 مخلوط شد. ضریب جذب غیرخطی مواد GO، Fe_2O_3 و نانوساختار GO- Fe_2O_3 با استفاده از تکنیک جاروب-Z روزنه باز [12] در طول موج 532 نانومتر با استفاده از یک دیود لیزر پیوسته مورد بررسی قرار گرفتند. ضریب جذب غیرخطی برای نمونه GO- Fe_2O_3 در شدت $69.92 \frac{\text{KW}}{\text{cm}^2}$ ، $94.63 \frac{\text{cm}}{\text{GW}}$ به دست آمد که حدود 2/44 برابر جذب غیرخطی اکسیدگرافن در همین شدت است. محدودکنندگی نوری نمونه ها نیز بررسی شد که نشان می داد قدرت محدودکنندگی GO- Fe_2O_3 نسبت به اکسیدگرافن خالص افزایش یافته است.

کارهای آزمایشگاهی

در این تحقیق از پودر اکسیدگرافن (GO) با ضخامت صفحات 3/4-7 نانومتر استفاده شد، که در شکل 1 الف الگوی پراش پرتوی ایکس آن آورده شده است. همچنین از نانوذرات Fe_2O_3 با اندازه تقریبی

به‌طور معمول ضریب جذب غیرخطی از روی رسم تراگیسلندگی بهنجار برحسب مکان‌های مختلف نمونه قابل اندازه‌گیری است. برای برازش منحنی‌های جاروب-Z از مدل زیر استفاده می‌شود:

$$T(z, S = 1) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{[-q_0(z)]^n}{(n+1)^{3/2}} \quad 1$$

که در آن $q_0(z) = \frac{\beta I_0 L_{eff}}{1+(z/z_0)^2}$ است و Z_0 طول رایلی

پرتوی لیزر می‌باشد که برابر است با $z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$ و w_0

شعاع کمره لیزر در کانون عدسی است که در اینجا با استفاده از آزمایش پراش لبه تیغه، 7/13 میکرومتر اندازه‌گیری شد. L_{eff} طول مؤثر نمونه می‌باشد که برابر

است با $L_{eff} = \frac{1-e^{-\alpha_0 l}}{\alpha_0}$ و α_0 ضریب جذب خطی

نمونه است. برای محاسبه جذب خطی نمونه‌ها (α_0)

از قانون بیر-لمبرت استفاده می‌شود:

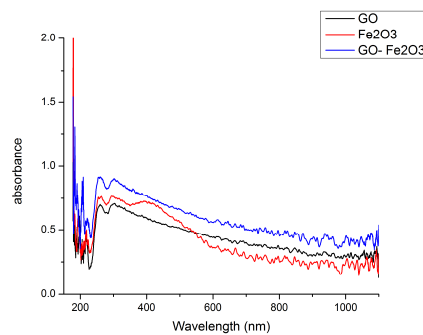
$$I = I_0 \times e^{-\alpha_0 l} \Rightarrow \alpha_0 = \frac{1}{l} \ln \left[\frac{I_0}{I} \right] \quad 2$$

که در آن I_0 شدت فرودی به نمونه و I شدت خروجی از نمونه است. از آنجایی که نمونه ثابت است مقدار کمره پرتو برای توان ورودی و توان خروجی یکسان است، بنابراین در رابطه بالا $\frac{I}{I_0} = \frac{P}{P_0}$ قرار داده شده است. با ثبت کردن توان خروجی برحسب توان ورودی در نمونه و با استفاده از رابطه 2 می‌توان جذب خطی نمونه را محاسبه کرد. لازم به ذکر است که برای محاسبه جذب خطی باید شدت ورودی به نمونه پایین باشد تا هیچ‌گونه جذب غیرخطی رخ ندهد.

با محاسبه ضریب جذب غیرخطی نمونه می‌توان قسمت موهومی پذیرفتاری مرتبه سوم آن را براساس رابطه زیر محاسبه کرد [11]:

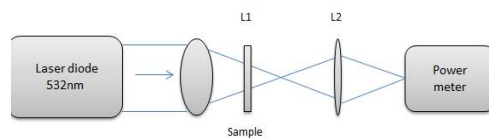
$$Im(\chi^{(3)})(esu) = \frac{10^{-2} \epsilon_0 c^2 n_0^2 \lambda \beta}{4\pi^2} \quad 3$$

هرسه محلول در محدوده طیف فرابنفش قرار دارند و اغلب مواد در این محدوده طول موجی، دارای طیف پهنی هستند. از طرفی مشاهده می‌شود افزودن نانوذرات Fe_2O_3 به محلول اکسیدگرافن با درصد ترکیبی یک به ده، باعث افزایش قابل ملاحظه، نسبت به دو نانوذره دیگر، در شدت جذبی شده است.



شکل 2. طیف جذب محلول‌های GO، Fe_2O_3 و GO- Fe_2O_3

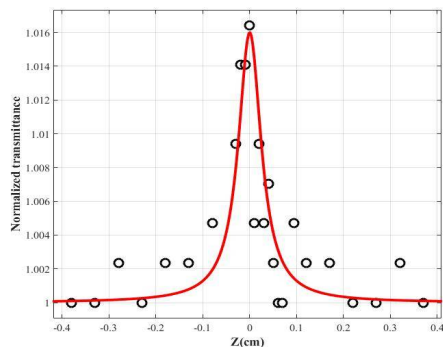
برای انجام آزمایش جاروب-Z نمونه‌ها درون یک سل کوآرتز به ضخامت 1 میلی‌متر ریخته شدند. پرتوی لیزر به‌وسیله یک عدسی با فاصله کانونی 10 میلی‌متر ($L1$) بر روی نمونه متمرکز شد و نمونه در راستای کانونی شدن پرتوی لیزر توسط یک ریل کامپیوتری جابه‌جا شد. در شکل 3 شماتیکی از چیدمان جاروب-Z مورد استفاده شده در این تحقیق نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود در انتها نور خروجی از نمونه به‌وسیله یک عدسی ($L2$) بر روی یک توان سنج متمرکز می‌شود تا تمام نور آشکار شود و اثرات شکست غیرخطی از آزمایش حذف شود.



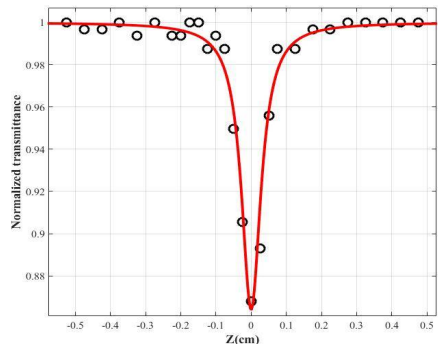
شکل 3. شماتیک چیدمان جاروب-Z روزنه باز استفاده شده در این تحقیق.

برانگیخته (ESA) رخ می‌دهد، به این ترتیب که الکترون‌های نوار ظرفیت تحریک شده و به نوار رسانش می‌روند و پس از آن، این الکترون‌ها با جذب یک فوتون دیگر به حالت‌های با انرژی بالاتر در نوار رسانش می‌روند.

(الف)



(ب)



شکل 4. نمودار جاروب Z-روزنه باز برای نمونه Fe_2O_3 در الف: توان 55/8 میلی‌وات. ب: توان 83/7 میلی‌وات همراه با برازش.

در برهم‌کنش نور با GO فرآیند جذب غیرخطی این ماده از طریق یک مکانیسم جذب دو فوتونی (TPA) صورت می‌گیرد، به این ترتیب که الکترون‌های نوار ظرفیت این ماده با جذب یک فوتون به یک تراز مجازی رفته و با جذب یک فوتون دیگر به نوار رسانش ماده می‌روند. در شکل 5 منحنی‌های جاروب Z-روزنه باز

که در آن C سرعت نور در خلاء، ϵ_0 ضریب گذردهی الکتریکی، n_0 ضریب شکست خطی، λ طول موج و β ضریب جذب غیرخطی است.

خاصیت محدودکنندگی نوری نمونه‌ها بر پایه مکانیسم جذب غیرخطی در طول موج 532 نانومتر مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور نمونه در محل کانون عدسی L1 قرار داده می‌شود و توان خروجی از نمونه برحسب توان ورودی ثبت می‌شود.

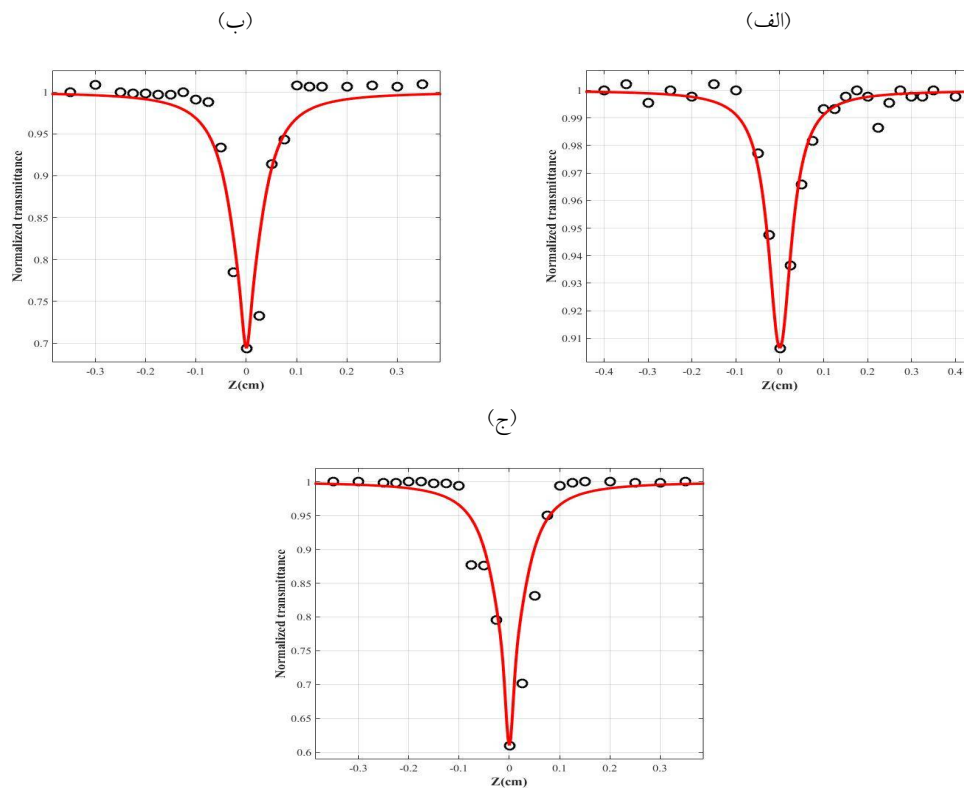
در شکل 4 منحنی جاروب Z-نمونه Fe_2O_3 آورده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود در توان 55/8 میلی‌وات (شکل 4الف) ماده، رفتاری مانند یک جذب اشباع پذیر (SA) از خود نشان می‌دهد، در حالی که در توان 83/7 میلی‌وات (شکل 4ب) در منحنی جاروب Z-این ماده یک دره مشاهده می‌شود که حاصل از رفتاری مشابه جذب اشباع معکوس (RSA) در ماده است. به عبارت دیگر با افزایش توان ورودی بر این نمونه، یک سوئیچ از حالت SA به RSA اتفاق می‌افتد. این پدیده قبلاً نیز برای موادی از قبیل اکسیدگرافن (GO)، نانوذرات Au، نانوذرات Ag و نانوذرات Pt مشاهده شده است [13-16]. مشاهده رفتار SA در نانوذرات Fe_2O_3 نشان می‌دهد که این ماده می‌تواند به عنوان یک ماده جذب اشباع‌پذیر مانند WS_2 ، BP، MoS_2 و GO در لیزرهای پالس کوتاه به کار برده شود [17-20].

مکانیسم درگیر در فرآیند SA بدین صورت است که با تابش لیزر به سطح نانوذرات Fe_2O_3 الکترون‌های نوار ظرفیت این ماده تحریک شده و به نوار رسانش می‌روند تا زمانی که نوار رسانش به اشباع برسد. پس از به اشباع رسیدن نوار رسانش، الکترون‌های نوار ظرفیت انرژی جذب نمی‌کنند و نوری عبوری از ماده افزایش می‌یابد. رفتار RSA در این نمونه از طریق فرآیند جذب حالت

نمونه اکسیدگرافن در توان‌های مختلف آورده شده است.

جدول 1. نتایج حاصل از برازش منحنی‌های جاروب-Z نمونه‌های ما در توان‌های مختلف.

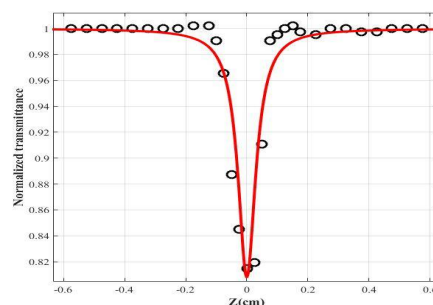
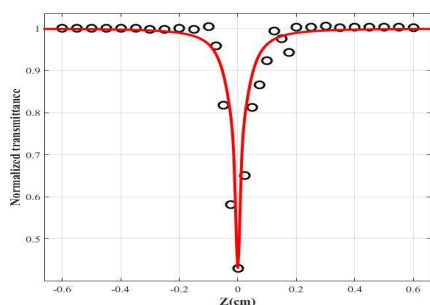
Sample	n_0	$\alpha_0 (\text{cm}^{-1})$	P(mW)	$\beta (\frac{\text{cm}}{\text{MW}})$	$\text{Im}(\chi^{(3)}) (\times 10^{-9} \text{esu})$
Fe_2O_3	1.49	0.103	55.8	-5.57	-1.33
			83.7	40.46	9.64
GO	1.43	0.059	55.8	38.76	8.51
			83.7	95.5	20.96
			104.9	83.43	18.32
GO- Fe_2O_3	1.51	0.107	55.8	94.63	23.16
			83.7	114.94	28.13
			104.9	93.52	22.89



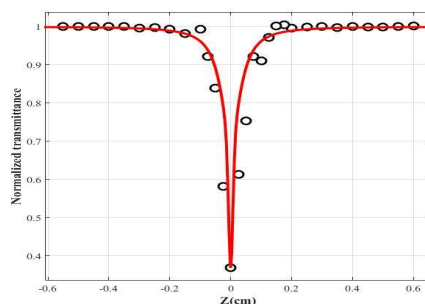
شکل 5. منحنی جاروب-Z برای اکسیدگرافن در (الف) توان 55/8 میلی‌وات (ب) توان 83/7 میلی‌وات و (ج) توان 104/9 میلی‌وات، که در اینجا خطوط پیوسته منحنی برازش و نقطه‌ها داده‌های تجربی هستند.

(الف)

(ب)



(ج)

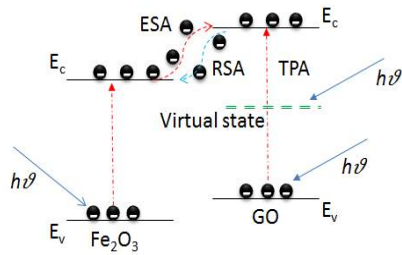


شکل 6. منحنی جاروب-Z روزنه باز نمونه $GO-Fe_2O_3$ همراه با برازش در الف: توان 55,8 ب: توان 83,7 ج: توان 104,9 میلی وات.

می دهند و چون دمای جوش حلال که در اینجا اتانول است، پایین است در محل برهم کنش نور با ماده حلال تبخیر شده و میکرو حباب هایی ایجاد می شود که به عنوان مرکز پراکندگی عمل می کنند و نور را از مسیر خود پراکنده می کنند [21].

شکل 7 نمودارهای محدودکنندگی حاصل از نمونه ها را نشان می دهد. مقدار عبور خطی برای نمونه های $GO-Fe_2O_3$ و GO, Fe_2O_3 ریخته شده در سل 1 میلی متری به ترتیب 98,83%، 99,32% و 98,77% محاسبه شد. نتایج نشان می دهد که قدرت محدودکنندگی نوری اکسید گرافن تنها در اثر مخلوط شدن با نانوذرات Fe_2O_3 افزایش پیدا کرده است (شکل 7الف). همچنین محدودکنندگی نوری نمونه $GO-Fe_2O_3$ در سل 10 میلی متری نیز اندازه گیری شد (شکل 7ب). عبور خطی این ماده در سل 10 میلی متری

به منظور مقایسه آزمایش جاروب-Z برای مخلوط $GO-Fe_2O_3$ نیز در همین توان ها انجام شد که نتایج حاصل از آن در شکل 6 نشان داده شده است. همان طور که در شکل های 5 و 6 دیده می شود در توان های مختلف همواره عمق دره ظاهر شده در منحنی جاروب-Z نمونه $GO-Fe_2O_3$ از اکسیدگرافن خالص بیشتر است که گواهی بر تقویت جذب غیرخطی اکسیدگرافن در اثر مخلوط شدن با نانوذرات Fe_2O_3 می باشد و نتایج حاصل از برازش منحنی ها که در جدول 1 آورده شده است، این گفته را تأیید می کند. در طی انجام آزمایش مشاهده شد که با افزایش توان فرودی به نمونه ها پراکندگی غیرخطی افزایش می یابد. منشاء پراکندگی غیرخطی در اینجا، به دلیل استفاده از منبع نوری پیوسته، اثرات حرارتی می باشد. در اثر تابش نور به نمونه ها، نانومواد گرم می شوند و این گرما را به حلال انتقال



شکل 8. مکانیسم‌های درگیر در فرآیند جذب غیرخطی نمونه $GO-Fe_2O_3$.

در تحقیق حاضر ضریب جذب غیرخطی برای نمونه $GO-Fe_2O_3$ حدود $1 \frac{cm}{KW}$ به دست آمد که بزرگتر از مقادیر گزارش شده برای کریستال پتاسیم دی کرومات (KDC) [22]، گرافن و اکسیدگرافن کاهش یافته [23] است. همچنین مقادیر گزارش شده برای کمپلکس‌های آهنی و $GO-TAP$ در مراجع 9 و 24، قابل مقایسه با نتایج به دست آمده در این تحقیق هستند.

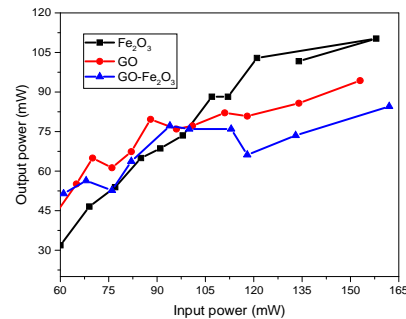
نتیجه گیری

به طور خلاصه، جذب غیرخطی نمونه‌های اکسیدگرافن (GO)، نانوذرات Fe_2O_3 و مخلوط $GO-Fe_2O_3$ با استفاده از روش جاروب-Z در طول موج 532 نانومتر، تحت تابش پیوسته مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد.

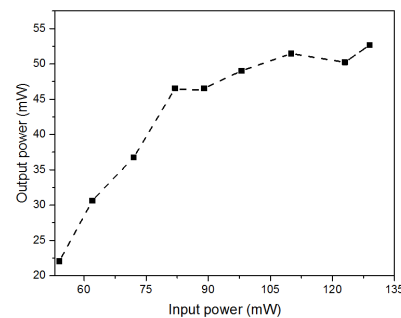
که ضریب جذب غیرخطی اکسیدگرافن در اثر مخلوط شدن با نانوذرات Fe_2O_3 تقویت شده است. در منحنی جاروب-Z روزنه باز نمونه Fe_2O_3 با افزایش توان فرودی به ماده یک تغییر حالت از قله به دره مشاهده شد که ناشی از تبدیل رفتار جذب اشباع به جذب اشباع معکوس در ماده است. همچنین در همه نمونه‌ها در توان‌های بالا یک پراکندگی غیرخطی مشاهده گردید که ناشی از میکروحباب‌های ایجاد شده در نمونه‌ها است. محدودکنندگی این نمونه‌ها نیز در طول موج 532 نانومتر در سل 1 میلی‌متری بررسی شد و مشاهده شد که محدودکنندگی نمونه $GO-Fe_2O_3$ بیشتر از سایر

90% محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش طول برهم‌کنش نمونه $GO-Fe_2O_3$ با لیزر قدرت محدودکنندگی آن افزایش می‌یابد.

(الف)



(ب)



شکل 7. الف: محدود کنندگی نمونه‌ها در سل 1 میلی‌متر. ب: محدودکنندگی $GO-Fe_2O_3$ در سل 10 میلی‌متر.

در شکل 8 شماتیک فرآیندهایی که ممکن است در فرآیند جذب غیرخطی نمونه $GO-Fe_2O_3$ مشارکت داشته باشند آورده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود یک مکانیسم RSA از نوار رسانش اکسیدگرافن به نوار رسانش Fe_2O_3 ، یک مکانیسم TPA از نوار ظرفیت اکسیدگرافن به نوار رسانش اکسیدگرافن و یک فرآیند ESA از نوار رسانش Fe_2O_3 به نوار رسانش اکسیدگرافن در فرآیند جذب غیرخطی این ماده درگیرند.

[9] R. Yamuna, S. Ramakrishnan, K. Dhara, R. Devi, N.K. Kothurkar, E. Kirubha, P.K. Palanisamy, Synthesis, characterization, and nonlinear optical properties of graphene oxide functionalized with tetra-amino porphyrin, *Journal of nanoparticle research* **15** (2013) 1399.

[10] S. Biswas, A.K. Kole, C.S. Tiwary and P. Kumbhakar, Enhanced nonlinear optical properties of graphene oxide-silver nanocomposites measured by Z-scan technique, *RSC Advances* **6** (2016) 10319–10325.

[11] M. Ebrahimi, A. Zakery, M. Karimipour, M. Molaei, Nonlinear optical properties and optical limiting measurements of graphene oxide-Ag@TiO₂ compounds, *Optical Materials* **57** (2016) 146–152.

[12] M. Sheik-Bahae, A.A. Said, T.-h. Wei, D.J. Hagan, E.W.V. Stryland, Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam, *IEEE Journal of Quantum Electronics* **26** (1990) 760–769.

[13] Z. Liu, Y. Wang, X. Zhang, Y. Xu, Y. Chen, J. Tian, Nonlinear optical properties of graphene oxide in nanosecond and picosecond regimes, *Applied Physics Letters* **94** (2009) 021902.

[14] S. Cai, X. Xiao, X. Ye, W. Li, C. Zheng, Nonlinear optical and optical limiting properties of ultra-long gold nanowires, *Materials Letters* **166** (2016) 51–54.

[15] M. Hari, S. Mathew, B. Nithyaja, S. A. Joseph, V.P.N. Nampoori, P. Radhakrishnan, Saturable and reverse saturable absorption in aqueous silver nanoparticles at off-resonant wavelength, *Optical and Quantum Electronics* **43** (2012) 49–58.

[16] Y. Gao, X. Zhang, Y. Li, H. Liu, Y. Wang, Q. Chang, W. Jiao, Y. Song, Saturable absorption and reverse saturable absorption in platinum nanoparticles, *Optics Communications* **251** (2005) 429–433.

[17] K. Wu, X. Zhang, J. Wang, X. Li, J. Chen, WS₂ as a saturable absorber for ultrafast photonic applications of mode-locked and Q-switched lasers, *Optics Express* **23** (2015) 11453–11461.

[18] Z.C. Luo, M. Liu, Z.N. Guo, X.F. Jiang, A.P. Luo, C.J. Zhao, X.F. Yu, W.C. Xu, H. Zhang, Microfiber-based few-layer black

GO- نمونه‌هاست. در ادامه محدودکنندگی مخلوط Fe₂O₃ در سل 10 میلی‌متر بررسی شد و مشاهده شد که با افزایش طول نمونه قدرت محدودکنندگی ماده افزایش پیدا می‌کند.

منابع

[1] T.F. Yeh, J.M. Syu, C. Cheng, T.H. Chang, H. Teng, Graphite oxide as a photocatalyst for hydrogen production from water, *Advanced Functional Materials* **20** (2010) 2255–2262.

[2] G. Eda, M. Chhowalla, Chemically derived graphene oxide: towards large-area thin-film electronics and optoelectronics, *Advanced Materials* **22** (2010) 2392–2415.

[3] C. Yao, J. Zhao, H. Ge, J. Ren, T. Yin, Y. Zhu, L. Ge, Fabrication of dual sensitive titania (TiO₂)/graphene oxide (GO) one-dimensional photonic crystals (1DPCs), *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Physicochemical and Engineering Aspects* **452** (2014) 89–94.

[4] N. Liaros, K. Iliopoulos, M.M. Stylianakis, E. Koudoumas, S. Couris, Optical limiting action of few layered graphene oxide dispersed in different solvents, *Optical Materials* **36** (2014) 112–117.

[5] J. Zhao, Y. Wang, P. Yan, S. Ruan, Y. Tsang, G. Zhang, H. Li, An Ytterbium-doped fiber laser with dark and Q-switched pulse generation using graphene-oxide as saturable absorber, *Optics Communications* **312** (2014) 227–232.

[6] H. Zhu, W. Cai, J. Wei, J. Liu, L. Zheng, L. Su, J. Xub, Y. Wang, 763 fs Passively mode-locked Yb:Y₂SiO₅ laser with a graphene oxide absorber mirror, *Optics & Laser Technology* **68** (2015) 120–123.

[7] X.-L. Zhang, X. Zhao, Z.-B. Liu, S. Shi, W.-Y. Zhou, J.-G. Tian, Y.-F. Xu, Y.-S. Chen, Nonlinear optical and optical limiting properties of graphene oxide-Fe₃O₄ hybrid material, *Journal of Optics* **13** (2011) 075202.

[8] J. Zhu, Y. Li, Y. Chen, J. Wang, B. Zhang, J. Zhang, W.J. Blau, Graphene oxide covalently functionalized with zinc phthalocyanine for broadband optical limiting, *Carbon* **49** (2011) 1900–1905.

- stabilized by [60] fullerene derivative, *Applied Physics B* **88** (2007) 89–92.
- [22] T. Thilak, M. Basheer Ahamed, G. Vinitha, Third order nonlinear optical properties of potassium dichromate single crystals by Z-scan technique, *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* **124** (2013) 4716–4720.
- [23] R. Karimzadeh, A. Arandian, Unusual nonlinear absorption response of graphene oxide in the presence of a reduction process, *Laser Physics Letters* **12** (2015) 025401.
- [24] M.D. Zidan, M.M. Al-Ktaifani, A. Allahham, Nonlinear optical investigation of the Tris(2',2-bipyridyl)iron(II) tetrafluoroborate using z-scan technique, *Optics & Laser Technology* **90** (2017) 174–178.
- phosphorus saturable absorber for ultra-fast fiber laser, *Optics Express* **23** (2015) 20030–20039.
- [19] H. Xia, H. Li, C. Lan, C. Li, X. Zhang, S. Zhang, Y. Liu, Ultrafast erbium-doped fiber laser mode-locked by a CVD-grown molybdenum disulfide (MoS₂) saturable absorber, *Optics Express* **22** (2014) 17341–17348.
- [20] S.D. Pana, L. Cui, J.Q. Liu, B. Teng, J.H. Liu, X.H. Ge, Passively Q-switched mode-locking Nd:GdVO₄ laser with a chemically reduced graphene oxide saturable absorber, *Optical Materials* **38** (2014) 42–45.
- [21] Y. gao, Q. chang, W. jiao, H. ye, Y. li, Y.wang, Y. song, D. zhu, Solvent-dependent optical limiting behavior of lead nanowires