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

شبیه‌سازی تحول پراش میدان دور در اثر انتشار باریکه پرتوان لیزر از درون نانوسیال

علی علی‌زاده سنگلی؛ یاسر رجبی
دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان، دامغان

چکیده –اخیرا مشاهده شده که برخی سیالات وقتی در معرض پرتو شدید لیزر قرار می‌گیرند، باعث ایجاد اختلاف فاز در پرتو شده و سپس منجر به ایجاد طرح پراش دایروی می‌شوند. در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی عددی تحول پراش پرتو لیزر در اثر عبور از یک نانوسیال بررسی می‌شود. همچنین با استفاده از نتایج تئوری و با شبیه‌سازی نرم افزاری، طرح‌های پراش ناشی از انتشار پرتو لیزر پرتوان از درون نانوسیال غیرخطی به دست می‌آید. با استفاده از طرح‌های پراش، می‌توان ضریب شکست غیرخطی نانوسیال را به دست آورد.

کلید واژه- نانوسیال، اپتیک غیرخطی، ضریب شکست غیرخطی، اثر خود کانونی، اثر خود واکانونی.

Simulation of far-field diffraction evolution due to the propagation of high-power laser beam from the nanofluid

Alizadeh Sangli, Ali; Rajabi, Yasser
School of Physics, Damghan University, Damghan 36716-41167, Iran.

Abstract- Recently, it has been observed that some fluids, when exposed to an intense laser beam, cause a phase difference in the beam and then lead to a circular diffraction pattern. In this paper, the evolution of laser beam diffraction due to the propagation of a nanofluid using numerical simulation is investigated. Also, using theoretical results and software simulations, diffraction patterns due to the propagation of high-power laser beam from nonlinear nanofluid are obtained. Then, Using diffraction schemes, the nonlinear refractive index of nanofluid can be obtained.

Keywords: Nanofluid, Nonlinear optic, Nonlinear refractive index, Self-focusing, Self-defocusing

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]

مقدمه

روش‌های مختلفی برای تعیین خواص نوری نانوسیال‌ها وجود دارد. این خواص نوری شامل جذب، انتقال، پراش و... است. کارهای تجربی، تئوری و شبیه‌سازی‌های عددی برای تعیین خواص اپتیکی و تحول آنها در نانو سیالات انجام شده است. تأثیر غلظت، اندازه و شکل نانوذرات و همچنین طول موج و شدت باریکه نور بر خواص نوری نانو سیالات مطالعه شده است. نتایج تحلیل‌ها و آنالیزهای عددی تاثیر جذب و عبور را به‌خوبی بر روی نانو سیالات نشان می‌دهد[۱]. در سال‌های اخیر بررسی تأثیر باریکه نوری همدوس پرشدت بر رفتار نانوسیال‌ها مورد علاقه محققین بوده است. تحقیقات نشان می‌دهد که نانوسیال در شدت‌های بالای پرتو لیزر، رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهد[۲،۳]. نانوسیالات با رفتار اپتیک غیرخطی دارای کاربردهای گسترده‌ای در زمینه ارتباطات نوری، ارتقاء ادوات اپتیکی، ساخت و طراحی لیزرها هستند [۴-۶]. پدیده‌های اپتیک غیرخطی به خواص ذاتی مواد و پرتو لیزر فرودی وابسته هستند و هر چه این خواص بهینه‌تر باشند، خواص اپتیک غیرخطی مانند ضریب شکست غیرخطی، بزرگ‌تر می‌شود.

در این مقاله به بررسی بر همکنش پرتو لیزر فرودی و نانوسیال غیرخطی پرداخته شده است. همچنین در این مقاله باتوجه‌به طرح پراش ایجاد شده، تحول محیط نانوسیال غیرخطی و نحوه تشکیل پدیده خود کانونی و یا خود واکانونی نانوسیال مطالعه می‌شود. همچنین یک روش ساده برای اندازه‌گیری دقیق مقدار ضریب شکست غیرخطی معرفی خواهد شد.

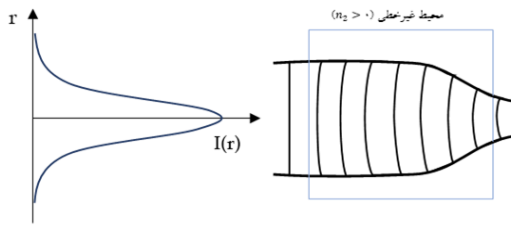
خود کانونی و خود واکانونی

اگر محیط قابلیت پاسخ غیرخطی به پرتو پرتوان لیزر داشته باشد، ضریب شکست n آن بر حسب مقدار شدتی که با آن مواجه می‌شود، تغییر خواهد کرد. این وابستگی را به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$n \approx n_0 + \frac{\chi^{(3)}|E|^2}{2n_0^2} \equiv n_0 + \frac{n_2}{2}|E|^2 \qquad (۱)$$

که در آن n_0 ضریب شکست خطی محیط، $\chi^{(3)}$ پذیرفتاری مرتبه سوم و n_2 ضریب شکست غیرخطی محیط است. همانطور که از رابطه (۱) مشخص است، ضریب شکست محیط به توان دوم بزرگی میدان یا همان شدت I وابسته است. اگر مقدار ضریب شکست غیرخطی محیط مثبت باشد ($n_2 > 0$) محیط مانند یک عدسی همگرا کننده عمل خواهد کرد و اگر ($n_2 < 0$) باشد، محیط غیرخطی مانند عدسی واگرا کننده پرتو عمل می‌کند.

توزیع شدت پرتو لیزر پس از خروج از لیزر به‌صورت یک تابع گاوسی است. این بدان معناست که ناحیه‌های مرکزی پهنای لیزر، از شدت بیشتری نسبت به ناحیه اطراف برخوردار هستند. این توزیع شدت گاوسی باعث یک تغییر فاز $\Delta\phi$ در پرتو ورودی به نانوسیال می‌شود. این تغییر فاز در مرکز توزیع شدت گاوسی لیزر از اطراف مقدار بیشتری داشته که باعث می‌شود نانوسیال همانند یک عدسی همگرا کننده یا واگرا کننده عمل کند.



شکل ۱ : تابع توزیع گاوسی پرتو لیزر و نحوه عبور صفحات موج از داخل شاره غیرخطی با ضریب شکست غیرخطی مثبت.

تعیین خود هم‌گرایی و خود واگرایی با استفاده از شکل پراش پرتو گاوسی

هنگامی که پرتو گاوسی از یک نانوسیال غیرخطی عبور می‌کند، یک الگوی توزیع شدت به شکل حلقه‌های

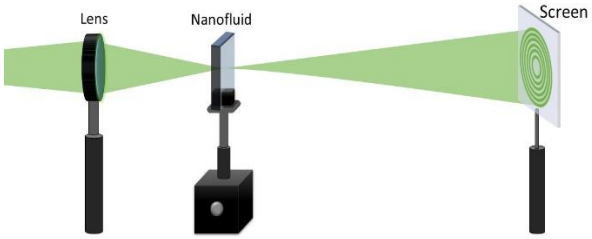
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]

متحدالمرکز بر روی پرده‌ای که در فاصله دور از محیط مورد بررسی قرار گرفته، شکل می‌گیرد. تفاوت اصلی بین این الگوها، توزیع شدت آنهاست. ناحیه مرکزی برخی از الگوها تیره و برخی دیگر از الگوها روشن است[۷].

نقطه تاریک یا روشن مرکزی، به طور عمده به علامت حاصل از تغییر فاز $\Delta\phi$ و شعاع انحنای جبهه موج بستگی دارد. تغییر فاز ایجاد شده در پرتو خروجی از محیط مورد بررسی، ناشی از ضریب شکست و تغییر در علامت شعاع انحنای پیشانی موج پرتو لیزر است. هنگامی که علامت تغییر فاز منفی باشد، یک نقطه تاریک مرکزی احاطه شده توسط حلقه‌های ضخیم پراش بر روی پرده ظاهر می‌شود. درحالی‌که وقتی علامت $\Delta\phi$ مثبت باشد، الگویی با نقطه روشن مرکزی همراه با حلقه‌های پراش نازک بر روی پرده ظاهر می‌شود.

تعیین مقدار ضریب شکست غیرخطی با استفاده از شکل پراش پرتو گاوسی

بررسی حلقه‌های پراش ایجاد شده توسط نانوسیال‌ها این امکان را می‌دهد تا با برخی خواص آن آشنا شویم. با استفاده از بررسی الگوی پراش پرتو لیزر خروجی از نانوسیال غیرخطی، به‌راحتی می‌توان ضریب شکست غیرخطی را به دست آورد. [۶ و ۷].



شکل ۲ : نمای کلی چیدمان بررسی حلقه‌های پراش توسط نانوسیال

همان‌طور که گفته شد، شدت پرتو باعث ایجاد تغییر فاز در پرتو فرودی به نانوسیال غیرخطی می‌شود. به‌ازای هر حلقه پراشی که بر روی پرده ایجاد می‌شود، تغییر فاز به‌اندازه 2π در نانوسیال افزایش می‌یابد. پس به ازای N حلقه ایجاد شده می‌توان نوشت:

$$\phi = 2\pi N \qquad (۲)$$

برای نمونه‌ای با ضخامت L ، اندازه مسیری که پرتو لیزر درون نانوسیال طی می‌کند از رابطه $\Delta = L\,\Delta n$ می‌آید. Δn تغییر در ضریب شکست بوده و باتوجه‌به معادله (۱) آن را به‌صورت $\Delta n = n_2 I$ در نظر می‌گیرند. تغییر فاز را می‌توان به‌صورت $\phi = k\Delta$ نوشت که در این معادله k عدد موج بوده و به طول موج λ وابسته است. با توجه به معادله‌های اخیر می‌توان نوشت:

$$n_2 = \frac{N\lambda}{LI} \qquad (۳)$$

این بدان معناست که با تغییر در شدت ورودی پرتو لیزر و شمارش تعداد حلقه‌های ایجاد شده، ضریب شکست غیرخطی نانوسیال به دست می‌آید.

شبیه‌سازی تحول پرتو میدان دور توسط نانوسیال

برای انجام شبیه‌سازی یک پرتو با توزیع شدت TEM_{00} را در نظر می‌گیریم که از درون یک محیط غیرخطی (مانند نانوسیال غیرخطی) عبور می‌کند. اگر L ضخامت نمونه در راستای Z باشد و w شعاع پهنای باریکه لیزر باشد، دامنه میدان ورودی پرتو لیزر به محیط را می‌توان به‌صورت تابع مختلط زیر، نوشت:

$$E(r,z_0) = E(0,z_0)\exp\left(-\frac{r^2}{w_p^2}\right)\exp\left(-\frac{ik_0 n_0 r^2}{2R}\right) \qquad (۴)$$

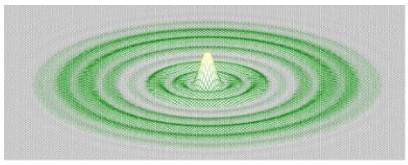
در این معادله r مربوط به مختصات قطبی، z_0 مختصات محل قرارگیری نمونه در راستای Z، k_0 عدد موج در خلاء، n_0 ضریب شکست هوا در اطراف نمونه، w_0 شعاع پهنای پرتو لیزر در هنگام ورود به نمونه و R شعاع انحنای میدان در

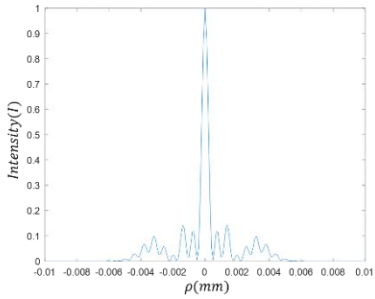
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]

موقعیت r است. با استفاده از تقریب فرانهوفر و فرنسل کیرشهف می‌توان توزیع شدت میدان دور که از خلأ در حال گذر است را به‌صورت زیر، نوشت [۸ و ۹]:

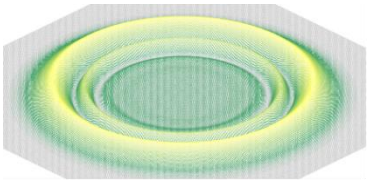
$$I = I_0 \left| \int_0^\infty J_0(k_0\theta r) exp\left[-\frac{r^2}{w_p^2} - i\phi(r)\right] r dr \right|^2 \quad (۵)$$

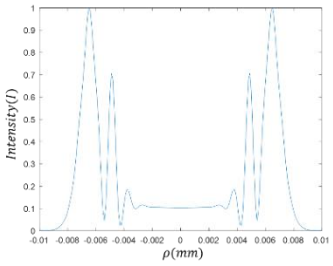
که $I_0=4\pi^2|E(0,z_0)\exp(-\alpha L/2)/i\lambda D|^2$ و $J_0(x)$ در معادله (۵)، جمله مرتبه صفر معادلات بسل می‌باشد. D فاصله محل قرارگیری پرده تا نانوشاره است که با زاویه پراش θ و مختصه شعاعی ρ به‌صورت $\rho = D\,\theta$ وابسته است.





شکل ۳ : شبیه‌سازی تحول میدان دور به ازای مقدار بیشینه تغییر فاز $\Delta\phi_0(z_0)= 8\pi$ و R=1.33 m .





شکل ۴ : شبیه‌سازی تحول میدان دور به ازای مقدار بیشینه تغییر فاز $\Delta\phi_0(z_0)= -8\pi$ و R=1.33 m .

نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از نرم افزار MATLAB پارامترهای موثر در پراش باریکه پرتوان لیزر از درون یک نانوسیال بررسی شد. این شبیه‌سازی برای پرتو واگرا با شعاع انحنای R>0 انجام شد. نتایج شبیه‌سازی شده به خوبی نشان می‌دهند برای نانوسیال با خاصیت خودکانونی، $\Delta\phi_0(z_0)$ منفی بوده (شکل ۴) و برای نانوسیال با خاصیت خود واکانونی، $\Delta\phi_0(z_0)$ مثبت است (شکل ۳). همچنین با استفاده از این روش و رابطه (۳) می‌توان ضریب شکست غیرخطی نانوسیال به دست آمد.

مرجع‌ها

[1] H. M. F. Rabbi, A. Z. Sahin, B. S. Yilbas, and A. Al-Sharafi, (2021). “Methods for the Determination of Nanofluid Optical Properties: A Review,” *Int. J. Thermophys.*, Vol. 42, No. 1, p. 9.

[2] S. Dadkhah, Y. Rajabi, and E. N. Zare, (2021). “Thermal Lensing Effect in Laser Nanofluids Based on Poly (aniline-co-ortho phenylenediamine)@ TiO Interaction,” *J. Electron. Mater.*, Vol. 50, No. 8, pp. 4896–4907.

[3] 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.

[4] E. Garmire, (2013). “Nonlinear optics in daily life,” *Opt. Express*, Vol. 21, No. 25, p. 30532.

[5] P. Knüppel, S. Ravets, M. Kroner, S. Fält, W. Wegscheider, and A. Imamoglu, (2019). “Nonlinear optics in the fractional quantum Hall regime,” *Nature*, Vol. 572, No. 7767, pp. 91–94.

[6] 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.

[7] F. W. Dabby, T. K. Gustafson, J. R. Whinnery, Y. Kohanzadeh, and P. L. Kelley, (1970). “Thermally self-induced phase modulation of laser beams,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 16, No. 9, pp. 362–365.

[8] S. Brugioni and R. Meucci, (2002). “Self-phase modulation in a nematic liquid crystal film induced by a low-power CO2 laser,” *Opt. Commun.*, Vol. 206, No. 4–6, pp. 445–451.

[9] S. H. Ali, (2016). “Journal of College of Education for pure sciences (JCEPS) Journal of College of Education for pure sciences (JCEPS),” Vol. 6, No. 1, pp. 69–81.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]