اولین کنفرانس ملی حسگرهای فیبرنوری- ۶ آبان ۱۴۰۰
ICOFS 2021
1st Iranian Conference on Optical Fiber Sensors
October 28, 2021
پژوهشکده لیزر و پلاسما

شبیه‌سازی برانگیزش موج صوتی با سازوکار الکتروتنگش در عبور پالس لیزر از یک تار نوری

مهدیس بیات[۱]، مسعود رضوانی جلال[۱،*]، مسعود پیشدست[۲]، علی‌رضا عبدی کیان[۱]

[۱] گروه فیزیک و فوتونیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران
[۲] پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ایران

چکیده: در این مقاله به شبیه‌سازی تولید موج صوتی با مکانیسم الکتروتنگش در تزریق یک پالس لیزر به هسته یک تار نوری پرداخته می‌شود. برای انجام مطالعات از معادله موج غیرهمگن هیدرودینامیکی (که چشمه آن واگرایی نیروی الکتروتنگش حجمی است) استفاده می‌گردد. فرض می‌شود که اختلال اولیه در چگالی تار متناسب با نیروی الکتروتنگش باشد. با حل معادله موج همگن، ویژه‌فرکانس‌های صوتی تار نوری و ویژه‌توابع چگالی پیدا می‌شوند. سپس، از قضیه بسط استفاده شده و انتشار صوت و بازتاب آن از جداره تار با استفاده از یک برنامه متمتیکا شبیه‌سازی می‌گردد. تولید اکوی صوتی با فاصله زمانی ۲۱ ns در یک تار نوری از جنس سیلیکای گداخته با قطر ۱۲۵ μm کاملاً مشهود می‌باشد.

کلید واژگان: الکتروتنگش؛ برانگیزش صوت؛ پالس لیزر؛ تار نوری.

Simulation of sound wave excitation by electrostriction mechanism in laser pulse transmission through an optical fiber

Mahdis Bayat[1], Masoud Rezvani Jalal[1*], Masoud Pishdast[2], Alireza Abdikian[1]

1 Department of Physics, Faculty of Science, Malayer University, Malayer, Iran.

2 Plasma Physics and Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Iran.

Abstract- In this paper, the generation of sound wave by electrostriction mechanism in injection of a laser pulse into the core of an optical fiber is simulated. The studies are accomplished by using of inhomogeneous hydrodynamic wave equation (with the divergence of volume electrostriction force as its source term). It is assumed that the initial perturbation of the fiber density is proportional to the electrostriction force. By solving the homogeneous wave equation, the acoustic eigen-frequencies of the optical fiber and the density eigen-functions are found. Then, the expansion theorem is used and propagation of the sound wave and its reflection from the fiber edge is simulated using a Mathematica code. Generation of sound echoes with temporal separation of 21 *ns* for a fiber made of fused silica of diameter 125 μm is completely evident.

Keywords: Electrostriction; Sound excitation; Laser pulse; Optical fiber.

* rezvanijalal@malayeru.ac.ir

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت http://opsi.ir/ قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

۱- مقدمه

اپتوآکوستیک لیزری یک پدیده موجی جذاب است که به برانگیزش موج صوتی در ماده با استفاده از لیزر می‌پردازد. مکانیسم‌های مختلفی برای تولید صوت در برهم‌کنش نور با ماده وجود دارد که از آنها می‌توان به اثر "الکتروتنگش" اشاره کرد [۱]. فوتوآکوستیک لیزری با منشأ الکتروتنگش یکی از عوامل اتلاف انرژی در مخابرات تار نوری است [۲و۳]. از طرف دیگر، تحریک امواج فوتوآکوستیکی (با دامنه فشار چندصد پاسکالی) در فیبرهای نوری و رخداد پراکندگی بریلوئن القایی می‌تواند در طراحی حسگرها و طیف‌سنج‌ها کاربرد داشته باشد [۳و۴].

آنچه که در مطالعات این اثر کمتر مورد توجه بوده است شبیه‌سازی دقیق و فهم فیزیکی آن می‌باشد. در این مقاله، به شبیه‌سازی تولید صوت الکتروتنگشی در عبور پالس لیزر از داخل یک تار نوری پرداخته می‌شود و اکوهای آکوستیکی نیز به طور واضح مشاهده می‌گردند.

۲- تئوری و فرمول‌بندی

برای بررسی الکتروتنگش لیزری از یک تار نوری با مقطع دایروی به شعاع b که هسته آن دارای شعاع a است ($b>>a$) استفاده می‌شود. اگر چگالی تعادلی شیشه تار با ρ_0 و تغییرات آن با ρ نشان داده شود آنگاه معادله حاکم بر ρ با تقریب هیدرودینامیکی می‌شود [۲]:

$$\nabla^2\rho - \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2\rho}{\partial t^2} = \boldsymbol{\nabla}.\boldsymbol{F} \qquad (۱)$$

که در آن v سرعت موج صوتی و $\boldsymbol{F}$ نیز چگالی حجمی نیروی الکتروتنگشی می‌باشد [۲]:

$$\boldsymbol{F} = \frac{\rho_0}{8\pi}\left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho}\right)\boldsymbol{\nabla}E^2 \qquad (۲)$$

ε ثابت دی‌الکتریک تار و E نیز اندازه میدان الکتریکی است. فرض می‌شود که میدان الکتریکی لیزر دارای توزیع گاوسی باشد:

$$E(r) = E_0 e^{-\frac{r^2}{2s^2}} \qquad (۳)$$

که در آن s شعاع مؤثر باریکه لیزری (تقریباً مساوی با a) است و r نیز مختصه شعاعی می‌باشد. با تقریب خوبی می‌توان چگالی مختل شده اولیه تار (یعنی $\rho(\boldsymbol{r},0)$) را متناسب با نیروی الکتروتنگش در نظر گرفت. ضریب این تناسب شامل ρ_0، E_0، $\partial\varepsilon/\partial\rho$ و ثابت کشسانی تار است. طول زمانی پالس لیزری را هم می‌توان از طریق مدل مناسبی وارد این ضریب کرد. البته برای ادامه کار نیازی به دانستن مقدار دقیق این ضریب نیست و با بهنجار کردن جواب می‌توان آنرا حذف کرد. معادله (۱) با فرض داشتن جواب‌های هارمونیک به شکل $\rho(\boldsymbol{r},t)=\rho(\boldsymbol{r})e^{i\omega t}$ و نیز وجود تقارن سمتی در مسئله، به معادله بسل تبدیل می‌گردد. جواب نهایی هم از برهم‌نهی تابع بسل $J_0(k_n r)$ به شکل زیر ساخته می‌شود:

$$\rho(r,t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n J_0(k_n r)e^{i\omega_n t} \qquad (۴)$$

که در آن $k_n=x_{1,n}/b$، $\omega_n=vk_n$ و $x_{1,n}$ هم ریشه nام تابع بسل مرتبه ۱ است و C_nها نیز ضرایب بسط می‌باشند:

$$C_n = \int_0^b \rho(r,t=0)J_0(k_n r)rdr \qquad (۵)$$

با داشتن مشخصات هندسی تار و پالس لیزری می‌توان تولید صوت در هسته و انتشار آن به سمت غلاف و بازتاب از دیواره تار را مطالعه کرد.

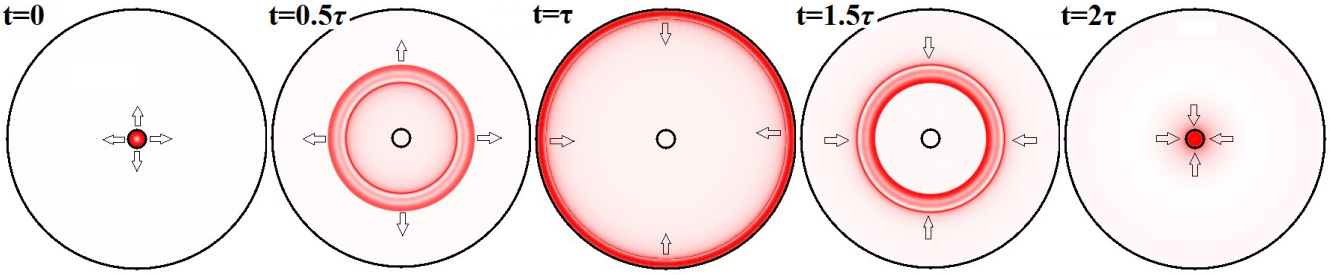
۳- محاسبات، بحث و بررسی و نتیجه گیری

برای انجام شبیه‌سازی از تار تک‌مُدی سیلیکای گداخته با مشخصات a=۸٫۸ μm و b=۱۲۵ μm استفاده می‌گردد. سرعت صوت در داخل این ماده v=۵٫۹۹۶ km/s است و فرکانس آن چند ده مگاهرتز (از مرتبه v/b) می‌باشد [۲و۳]. برای اجرای شبیه‌سازی از یک کد کامپیوتری که

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت http://opsi.ir/ قابل دسترسی باشد.

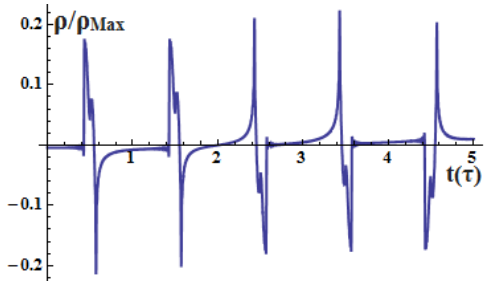
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

توسط نویسندگان مقاله نوشته شده است استفاده می‌گردد. نمودار دو بعدی چگالی موج صوتی در شکل ۱ نشان داده شده است. این شکل به خوبی تولید موج صوتی در هسته، نفوذ آن به غلاف، انتشار آن به سمت دیواره بیرونی تار و بازتاب از آنرا نشان می‌دهد. مدت زمان رسیدن پالس صوتی به لبه بیرونی تار ns ۲۱ است که با $\tau=b/v$ برابر می‌باشد.



شکل ۱- (به ترتیب از چپ به راست) تولید پالس صوتی در هسته تار نوری، انتشار آن به سمت جداره خارجی غلاف، بازتاب از دیواره تار و برگشت به سمت هسته.

از آنجا که در این مسئله هیچ اتلافی لحاظ نشده است حرکت رفت و برگشتی صوت بی‌نهایت بار رخ می‌دهد. همین بازتاب‌های مکرر باعث می‌شود که در هر نقطه از تار یک اکو ایجاد گردد. در شکل ۲ تعدادی از این اکوها در نقطه‌ای به فاصله $b/2$ از مرکز تار آورده شده است:



شکل ۲- اکوهای صوتی در نقطه $r=b/2$ داخل تار که ناشی از بازتاب‌های مکرر پالس صوتی می‌باشد. ρ_{Max} بیشینه تغییر چگالی اولیه تار است.

از شکل ۲ مشخص است که فاصله بین اکوها $\tau=b/v=$۲۱ ns می‌باشد یعنی فقط به مشخصات تار بستگی دارد. تغییر شکل‌های ایجاد شده در هر تناوب اکو ناشی از اختلاف فازهای 180^{o} و 0^{o} است که در بازتاب از جداره بیرونی غلاف و تداخل در هسته تار ایجاد شده‌اند. از آنجایی که چگالی ρ به چگالی بیشینه ρ_{Max} بهنجار شده است نمودار ۲ مستقل از ρ_0، E_0، $\partial\varepsilon/\partial\rho$، ثابت کشسانی تار و طول پالس لیزری است.

در این مقاله، به مطالعه محاسباتی تولید موج صوتی در عبور پالس لیزری از داخل یک تار نوری با سازوکار الکترونتگش پرداخته شد. دیده شد که این موج در هسته تار تولید شده و وارد غلاف می‌شود و ضخامت آن را با سرعت صوت طی کرده و به جداره خارجی می‌رسد و از آنجا نیز بازتاب می‌گردد. صوت بازتابی از دوباره به هسته تار بر می‌گردد و با جبهه موجی که از دیواره مقابل آمده تداخل می‌کند و از دوباره به سمت جداره حرکت می‌کند. این حرکت رفت و برگشتی در همه قسمت‌های تار به صورت اکوی صوتی احساس می‌شود.

مراجع

1. Pascal Ruello and Vitalyi E. Gusev, **Ultrasonics 56** (2015) 21–35.
2. A.S. Biryukov, M.E. Sukharev and E.M. Dianov, **Quantum Electronics 32** (9) (2002) 765-775.
3. J.-Charles Beugnot and V. Laude, **Physical Review B 86** (2012) 224304.
4. Hilel Hagai Diamandi et al; "Opto-Mechanical Interactions in Multi-Core Optical Fibers and Their Applications", **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 26** (4) (2020) 2600113.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت http://opsi.ir/ قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]