



پژوهشکده لیزر و پلاسما

اولین کنفرانس ملی حسگرهای فیبر نوری - ۱۴۰۰

ICOFS 2021

1st Iranian Conference on Optical Fiber Sensors

October 28, 2021



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

مهدیس بیات^۱، مسعود رضوانی جلال^{۱*}، مسعود پیشدست^۲، علی رضا عبدی کیان^۱

^۱ گروه فیزیک و فوتونیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

^۲ پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، ایران

چکیده: در این مقاله به شبیه سازی تولید موج صوتی با مکانیسم الکتروتنگش در تزریق یک پالس لیزر به هسته یک تار نوری پرداخته می شود. برای انجام مطالعات از معادله موج غیرهمگن هیدرودینامیکی (که چشمه آن واگرایی نیروی الکتروتنگش حجمی است) استفاده می گردد. فرض می شود که اختلال اولیه در چگالی تار متناسب با نیروی الکتروتنگش باشد. با حل معادله موج همگن، ویژه فرکانس های صوتی تار نوری و ویژه توابع چگالی پیدا می شوند. سپس، از قضیه بسط استفاده شده و انتشار صوت و بازتاب آن از جداره تار با استفاده از یک برنامه متممیکا شبیه سازی می گردد. تولید اکوی صوتی با فاصله زمانی ۲۱ ns در یک تار نوری از جنس سیلیکای گداخته با قطر ۱۲۵ μm کاملاً مشهود می باشد.

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 Bayat¹, Masoud Rezvani Jalal^{1*}, Masoud Pishdast², Alireza Abdikian¹

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

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 [۲ و ۳]. 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 [۳ و ۴].

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 ($b \gg a$) 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]:

$$\nabla^2 \rho - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = \nabla \cdot \mathbf{F} \quad (1)$$

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

$$\mathbf{F} = \frac{\rho_0}{8\pi} \left(\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \rho} \right) \nabla E^2 \quad (2)$$

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

$$E(r) = E_0 e^{-\frac{r^2}{2s^2}} \quad (3)$$

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 $\rho(r, 0)$) را متناسب با نیروی الکتروتنگش در نظر گرفت. ضریب این تناسب شامل 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 $\rho(r, t) = \rho(r) e^{i\omega t}$ 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:

$$\rho(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n J_0(k_n r) e^{i\omega_n t} \quad (4)$$

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

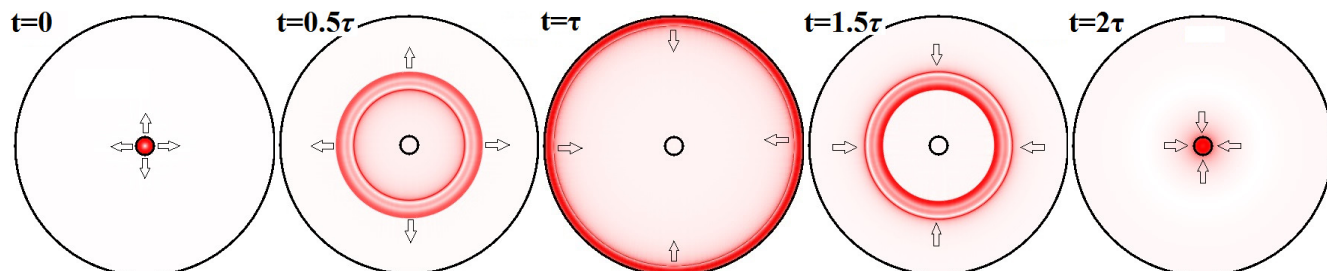
$$C_n = \int_0^b \rho(r, t=0) J_0(k_n r) r dr \quad (5)$$

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.

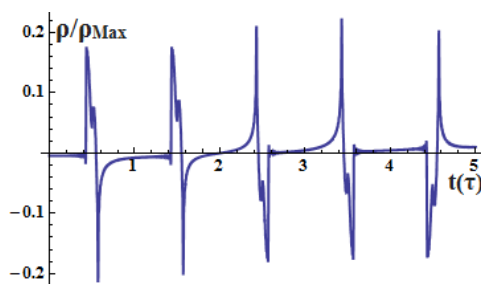
۳- محاسبات، بحث و بررسی و نتیجه گیری

برای انجام شبیه‌سازی از تار تک‌مُدی سیلیکای گداخته با مشخصات $a = 8.8 \mu m$ و $b = 125 \mu m$ استفاده می‌گردد. سرعت صوت در داخل این ماده $v = 5996 \text{ km/s}$ است و فرکانس آن چند ده مگاهرتز (از مرتبه v/b) می‌باشد [۲ و ۳]. برای اجرای شبیه‌سازی از یک کد کامپیوتری که

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 21 ns 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 $\tau=b/v=21\text{ ns}$ می‌باشد یعنی فقط به مشخصات تار بستگی دارد. تغییر شکل‌های ایجاد شده در هر تناوب اکو ناشی از اختلاف فازهای 180° و 0° 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 $\partial\epsilon/\partial\rho$ ، E_0 ، ρ_0 ، 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 الکتروتنگش 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 Vitaliy 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.