بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

فشار اپتیکی ناشی از میدان میرا بر روی یک سلول در یک ساختار تشدیدی چند لایه‌ای

دریا عظمی، عبدالله حسن‌زاده

گروه فیزیک، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

چکیده –در این مقاله فشار اپتیکی میدان میرای ناشی از یک موج هدایت شده در یک موجبر در یک ساختار رزونانسی چندلایه وارد بر سلول (غشا سلولی- سیتوپلاسم- غشا سلولی) به صورت تئوری مورد بررسی قرار گرفته شده است. اثرات تغییر ضخامت فیلم موجبری و ضریب شکست نمونه بر روی فشار اپتیکی بررسی شده است. نتایج افزایشی از یک تا دو مرتبه در فشار را در مقایسه با ساختار های لایه فلزی نشان می دهد. همچنین نیروی اپتیکی ناشی از این فشار وابسته به ضریب شکست نمونه می تواند جاذبه یا دافعه باشد.

کلید واژه- ساختار رزونانسی، سلول، فشار اپتیکی، موجبر، میدان میرا .

Evanescent Field Optical Pressure on a Cell in a Resonant Structure

Darya Azami, Abdollah Hassanzadeh

Department of Physics, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

Abstract- In this paper, the optical pressure acting on a cell (membrane-cytoplasm-membrane) arising from the evanescent field of a guided wave in a multilayer resonance structure is investigated theoretically. The effects of the waveguiding film thickness and the sample refractive index on the optical pressure are numerically analyzed. Results show one or two orders of magnitude enhancement in the optical pressure compared to that in metal layer structures. Moreover, depending on the refractive index of the sample, the optical pressure can be attractive or repulsive.

Keywords: Resonance structure, Cell, Optical pressure, Waveguide, Evanescent field.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-29]

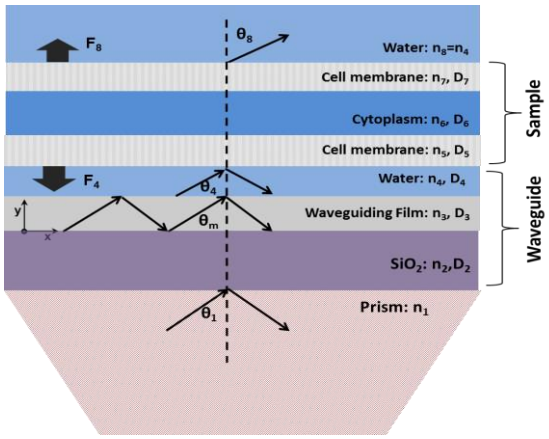
۱- مقدمه

فشار اپتیکی ناشی از یک پرتو لیزر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و به طور گسترده‌ای در زمینه‌های گوناگون از جمله زیست شناسی، برای دستکاری گزینشی، حرکت و به دام‌انداختن سلول‌های زیستی مورد بررسی قرارگرفته‌است[۴-۱]. نیروی اپتیکی میدان میرای ناشی از یک منشور دی الکتریک وارد بر یک کره ی کوچک یا فیلم دی الکتریک به طور تئوری تحلیل شده است[۸-۵].

وقتی که نور دستخوش بازتاب داخلی کلی از سطح یک دی‌الکتریک شود میدان میرا ظاهر می‌شود، شدت میدان میرا با افزایش فاصله از سطح به طور نمایی کاهش می‌یابد. معمول‌ترین روش دستیابی به میدان میرا، امواج میرای تولید شده به وسیله بازتابش داخلی کلی از یک منشور است.

شدت بالای امواج میرا برای کاربرد در اپتیک غیر خطی مفید شناخته شده است [۹]. همچنین از میدان میرا به عنوان یک منبع روشنایی برای تحریک مولکول‌های فلورسنس موجود در محیط مایع نزدیک یک سطح مشترک و همچنین مولکول‌های فلورسنس روی سطح سلول استفاده می‌شود [۱۰].

با توجه به اهمیت فشار اپتیکی و از طرفی کوچک بودن این فشار افزایش آن از اهمیت خاصی برخوردار است. در مراجع ۱۱و ۱۲با مقایسه میدان میرای ناشی از دو حالت، تشدید پلاسمون سطحی (شامل لایه فلز) و ساختار کاواک تشدید (شامل لایه‌ی دی‌الکتریک)، نشان داده شده است که ساختار دی الکتریک افزایش ۶ برابری را در میدان میرا، نسبت به پلاسمون سطحی ایجاد می کند. مزیت دیگر استفاده از ساختار دی الکتریک نسبت به پلاسمون سطحی جلوگیری از اتلاف توانی ناشی از اثرات گرمایی ناشی از فلز است، هم چنین تشدید پلاسمون‌های سطحی فقط برای موج با قطبش P برانگیخته می‌شود اما ساختار شامل دی الکتریک برای هر دو قطبش P ,S قابل استفاده است. فشار میدان میرا بر روی یک دی‌الکتریک ناشی از منشور که شامل یک لایه فلز است تحلیل شده است [۱۳]. در این مقاله ما با استفاده از یک سیستم رزونانسی چندلایه [۱۱] فشار وارد بر یک سلول (غشأ سلولی- سیتوپلاسم- غشأ سلولی) غوطه‌ور در مایع را حساب می کنیم و اثرات تغییر ضخامت دی‌الکتریک دوم (TiO_2) و ضریب شکست سیتوپلاسم بر روی فشار اپتیکی را بررسی می کنیم.



شکل ۱: سیستم رزونانسی چندلایه که شامل یک منشور که بر روی آن دو لایه‌ی دی‌الکتریک و یک نمونه زیستی (غشأ سلولی- سیتوپلاسم- غشأ سلولی) غوطه ور در مایع قرار دارد n_i و D_i (i=1-8) به ترتیب ضخامت و ضریب شکست لایه i ام و θ_i زاویه فرودی در لایه iام هستند.

۲- میدان های الکترومغناطیسی در مرزهای نمونه

ساختاری ۸ لایه مطابق شکل ۱ [۱۱] را برای محاسبه فشار وارد برنمونه درنظر می‌گیریم. لایه‌های سیستم رزونانسی به ترتیب عبارتند از: منشور با ضریب شکست n_1، لایه‌ی دی‌الکتریک اول (SiO_2) با ضریب شکست کمتر از منشور(n_2) وضخامت آن D_2 و لایه‌ی دی‌الکتریک دوم (TiO_2) باضریب شکست بیشتر از منشور(n_3) وضخامت D_3، که بر روی آن یک سلول (غشأ سلولی- سیتوپلاسم- غشأ سلولی) غوطه ور در مایع قرار دارد. لایه‌ی دی الکتریک اول و دوم باهم تشکیل یک موجبر می‌دهند که لایه اول زیرلایه و لایه دوم فیلم موجبری است. فرض می کنیم تمام محیط‌ها همگن، همسانگرد و غیر مغناطیسی هستند. n_i و D_i (i=1-8) به ترتیب ضریب شکست و ضخامت لایه i ام ، θ_i زوایای تابشی موج فرودی در لایه i ام و θ_m زوایای جفت شدگی موجبر است. مبدا دستگاه مختصات(x,y,z) را در مرز مشترک منشور و زیرلایه موجبر(SiO_2) قرار می‌دهیم.

با فرض اینکه یک موج الکترومغناطیسی تخت با قطبش p بر منشور وارد می شود و صفحه تابشی صفحه xy است. میدان الکتریکیE_4 (E_8)در سطح پایین (بالای) نمونه از تئوری فیلم های چند لایه [۱۴] به صورت زیر می تواند نوشته شود[۱۳]:

$$\vec{E}_4 = \frac{E_1 Cos\theta_1}{C\cos\theta_4}[(r_2+t_2)Cos\theta_4\hat{x}+(r_2-t_2)Cos\theta_4\hat{y}] \quad (۱)$$

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-29]

$$\vec{H}_4 = \frac{E_1 Cos\theta_1}{C\cos\theta_4} Y_0 n_4 (t_4 - r_4)\hat{z} \quad (۲)$$

$$\vec{E}_8 = \frac{E_1 Cos\theta_1}{C\cos\theta_8} t_8 [Cos\theta_8 \hat{x} - Sin\theta_8 \hat{y}] \quad (۳)$$

$$\vec{H}_8 = \frac{E_1 Cos\theta_1}{C\cos\theta_8} Y_0 n_8 t_8 \hat{z} \quad (۴)$$

۳- فشار اپتیکی میدان میرا وارد بر سلول

نیروی اپتیکی وارد بر روی یک جسم غوطه ور در یک سیال می تواند از متوسط زمانی شار میدان‌های انتقالی از یک سطح دلخواه به دست آید[۱۵]، با استفاده از تانسور تنش ماکسول می‌توان نیروی اپتیکی را تعیین کرد، نیروی اپتیکی محاسبه شده با استفاده از تانسور تنش ماکسول، یک بیان الکترومغناطیسی برای نیرو است که ناشی از پایستگی تکانه‌ی میدان الکتریکی در مرز دو ماده با ثابت دی‌الکتریک مختلف است و راستایش عمود بر سطح مرز بین دو محیط است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$F = \oiint_S ds . < M > \quad (۵)$$

که در آن s هر سطح اختیاری در نمونه و <M> متوسط زمانی تانسور تنش ماکسول است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$< M > = \frac{1}{8\pi} \mathrm{Re} \begin{bmatrix} (n_m^2 EE^* + HH^*) \\ -\frac{1}{2}(n_m^2 |E|^2 + |H|^2) I \end{bmatrix}, m = 4,8 \quad (۶)$$

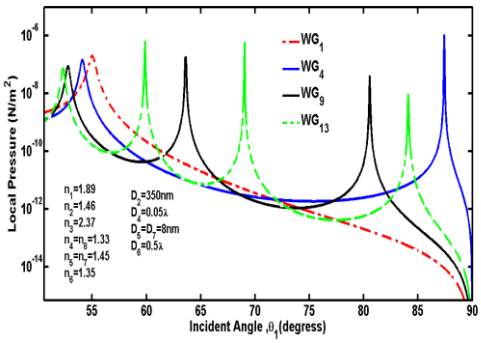
که در آن * و Re به ترتیب نشان دهنده مزدوج مختلط و قسمت حقیقی عبارت است. فشار اپتیکی وارد بر سلول برابر است با:

$$P_y = F_y / \Delta S = \left(F_8 - F_4\right) / \Delta S \quad (۷)$$

$$P_y = \frac{|E_1|^2}{2} \varepsilon_0 \cos\theta_1 \left[n_4^2 \left(|t_4|^2 + |r_4|^2 \right) - n_8^2 |t_8|^2 \right] \quad (۸)$$

۴- نتایج عددی

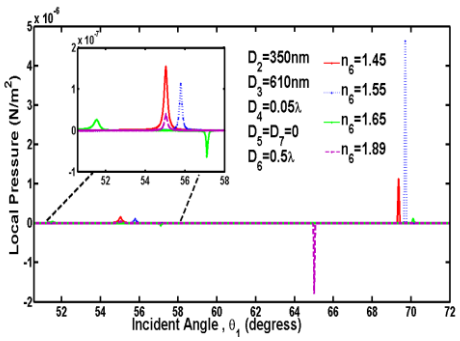
با استفاده از معادله ۸ فشار اپتیکی را به طور عددی برای منشور با ضریب شکست n_1=1.89 ، لایه‌ی دی الکتریک اول (SiO_2) چسبیده به منشور با ضریب شکست n_2=1.46 و ضخامت ۳۵۰nm =D_2، لایه‌ی دوم(TiO_2) با ضریب شکست n_3=2.37 که ضخامت (D_3) آن را متغییر در نظر می‌گیریم و محیط مایع با ضریب شکست n_8= n_4=1.33 است. شکل ۲ فشار اپتیکی وارد بر سلول را بر حسب زاویه تابشی بر منشور برای ساختار با ضخامت های مختلف $90nm, 610nm, 1460nm, 2140nm$ فیلم موجبری ، (موجبرهای ۱، ۴، ۹و ۱۳ مده) نشان می دهد.



شکل ۲:نمودار فشار اپتیکی وارد بر سلول بر حسب زاویه تابیده بر منشور، برای ساختار شامل موجبرهای مختلف با لایه‌ی دی الکتریک دوم (TiO_2) با ضخامت‌های متفاوت است. WG_i , (i = 1, 4, 9, 13) نشان دهنده موجبر i مده است.

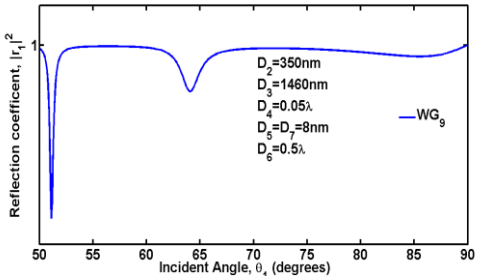
در شکل ۲ مشاهده می‌کنیم که با افزایش تعداد مدهای موجبر تعداد پیک های فشار تغییر می‌کند که تعداد پیک‌ها برای موجبرهای ۱، ۴، ۹ و ۱۳ مده به ترتیب ۱، ۲، ۳، و ۴ پیک است. بیشترین مقدار فشار مربوط به ساختار شامل موجبر ۴ مده و دارای مقداری از مرتبه $10^{-6} N/m^2$ و همچنین نوع فشار برای هر ۴ ساختار همواره دافعه است. در شکل ۳ فشار اپتیکی بر حسب زاویه فرودی بر منشور برای ساختارهای با ضریب شکست های مختلف $n_6 = 1.45, 1.55, 1.75, 1.89$ برای سیتوپلاسم با صرف نظر از غشا ($D_5 = D_7 = 0$) است و ضخامت فیلم موجبری ثابت و برابر ۶۱۰ نانومتر و ضخامت و ضریب شکست سایر لایه ها ثابت و برابر مقادیر شکل ۲ است. در شکل ۳ می‌بینیم که برای ضریب شکست ۱/۵۵ و ۱/۴۵نوع فشار همواره جاذبه و برای ضریب شکستهای۱/۶۵ و ۱/۸۹ فشار هم جاذبه و هم دافعه است. بیشترین مقدار فشار دافعه مربوط به $n_6 = 1.55$ و بیشترین فشار جاذبه مربوط به $n_6 = 1.89$ است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-29]



شکل ۳:نمودار فشار اپتیکی وارد بر سلول بر حسب زاویه تابشی بر منشور، برای ساختار شامل سیتوپلاسم‌های با ضریب شکست متغیر با صرف نظر از غشا ($D_5 = D_7 = 0$).

شکل ۴ نمودار ضریب انعکاس بر حسب زاویه تابشی بر منشور را برای موجبر ۹مده نشان می دهد. ضریب شکست و ضخامت لایه ها ثابت و برابر مقادیر شکل ۳ است. در حالت واقعی قسمت موهومی ضریب شکست فیلم موجبری را در نظر می‌گیریم[۱۱]. لازم به ذکر است پیک های فشار در جایی رخ می دهد که ضریب انعکاس دارای کمترین مقدار است.



شکل ۴: نمودار ضریب انعکاس از منشور بر حسب زاویه فرودی بر منشور، برای ساختار شامل موجبر نه مده با ضخامت فیلم ۱۴۶۰ نانومتر. (برای هم خوانی با حالت واقعی قسمت موهومی ضریب شکست لایه سوم را 3.8×10^{-5} در نظر می‌گیریم[۱۱]) .

۵- نتیجه‌گیری

دراین مقاله به طور تئوری فشار اپتیکی ناشی از میدان میرای یک منشور بر روی یک سلول را به دست آوردیم. فشار اپتیکی برای ساختارهای با ضخامت‌های متغیر فیلم موجبری (TiO_2) دارای پیک‌های مختلف و مقادیر متفاوت فشار است. همچنین نیروی اپتیکی ناشی از فشار اپتیکی می‌تواند دافعه یا جاذبه باشد. نتایج نشان می دهد که مقدار فشار اپتیکی در این ساختار مورد مطالعه نسبت به ساختار شامل لایه فلز [۱۳] یک تا دو مرتبه افزایش یافته است.

مراجع

[1] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm and S. Chu, *Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles*, **Opt. Lett.** 11 (1986) 288-290.

[2] A. Ashkin, J. M. Dziedzic and T. M. Yamane, Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams**, Nature.** 330 (1987) 769-771.

[3] A. Ashkin, *Optical-trapping micromanipulation using 780-nm diode lasers*, **Biophys. J**. 61 (1992) 569-582.

[4] Y. Liu, G. J. Sonek, M. W. Berns, and B. J. Tromberg, Physiological monitoring of optically trapped cells: assessing the effects of confinement by 1064-nm laser tweezers using microfluorometry, **Biophys. J.** 71 (1996) 2158-2167.

[5] S. Chang, J. H. Jo and S. S. Lee, Theoretical calculations of optical force exerted on a dielectric sphere in the evanescent field generated with a totally-reflected focused gaussian beam, **Opt. Comm**. 108, (1994) 133-144.

[6] S. Chang, J. T. Kim, J. H. Jo and S. S. Lee, Optical pressure exerted on a dielectric film in the evanescent field of a Gaussian beam, **Opt. Comm.** 129 (1996) 394-404.

[7] S. Chang, J. T. Kim, J. H. Jo and S. S. Lee, Optical force on a sphere caused by the evanescent field of a Gaussian beam; effects of multiple scattering**, Opt. Comm**. 139, (1997) 252-262.

[8] S. Chang, J. T. Kim, J. H. Jo and S. S. Lee, J. Korean, Optical torque exerted on a sphere in the evanescent field of a circularly-polarized Gaussian laser beam, **Phys. Soc**. 30, 377 (1997).

[9] Y.R. Shen, in: Les Houches, Session LIII, 1990, *Fundamental systems in quantum optics, eds. J. Dalibard J-M. Raimond and J. Zinn-Justin*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1992.

[10] A. Hassanzadeh, M. Nitsche, S. Armstrong, S. J. Dixon, U. Lanbein, S. Mitler, Waveguide evanescent field fluorescence: thin film fluorescence intensities and its application in cell biology", **Applied Physics Letters**, **92**, 233503 (2008).

[11] R. Kaiser, Y. Levy, N. Vansteenkiste, A. Aspect, W. Seifert, D. Leipold and J. Mlynek, *Resonant enhancement of evanescent waves with a thin dielectric waveguide***, Opt. Comm. 104**, 104 (1994). 234-240

[12] Le'vy, Y. Zhang and J.C. Loulergue, Optical Field Enhansment Comparison Between Long-Range Surface Plasma Waves, And Waves Induced By Resonant Cavity, **Opt. Comm**. (1985) 155-165.

[13] B. M. Han and S. Chang, S. S. Lee, Enhancement of the Evanescent Field Pressure on a Dielectric Film by Coupling with Surface Plasmons, **Journal of the Korean Physical Society**. 35 (1999) 180-185.

[14] H. A. Macleod, *Thin Film Optical Filters*, p. 11-70, Adam Hilger, Bristol, 1986.

[15] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, Wiley, Berkeley, California, 1988.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-29]