بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

تغییرات موضعی قطبش مد نوری هدایت شده در موجبر کانالی ساخته شده به روش نفوذ تیتانیوم در بستر بلور لیتیوم نایوبایت

مهدی جاهد[۱] و رحمان نوروزی[۱،۲]

[۱] دانشکده فیزیک، مرکز تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران

[۲] مرکز پژوهشی اپتیک و فوتونیک، مرکز تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران

چکیده - تغییرات موضعی قطبش مُد هدایت شده‌ی نوری در موجبر ساخته شده به روش نفوذ تیتانیوم در بستر بلور لیتیوم نایوبایت بصورت نظری مطالعه شده است. نرخ افزایش ضرایب شکست عادی و غیرعادی در اثر نفوذ تیتانیوم در موجبر متفاوت است. چنین تفاوتی باعث ایجاد دوشکستی فضایی در سطح مقطع موجبر می‌شود. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که حالت قطبش سطح مقطع مُد هدایت شده در امتداد شعاع و نسبت به زاویه‌ی سمتی تغییر می‌کند. همچنین نرخ تغییر حالتهای قطبش در راستای انتشار نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

کلید واژه- اپتیک مجتمع، قطبش، لیتیوم نایوبایت، موجبر کانالی.

Topological Polarization Changes of an Optical Guided-Mode in a Ti:$LiNbO_3$ Waveguide

Mehdi Jahed[1] and Rahman Nouroozi[1, 2]

[1] Physics department, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran

[2] Optics & Photonics Research Center, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran

Abstract- Topological polarization behavior of the optical guided mode in a Ti indiffused Lithium Niobate (Ti:$LiNbO_3$) waveguide is investigated theoretically. It is revealed the azimuth change of the state of the polarization for e.g. fundamental guided mode. Ti indiffusion causes a different slope of increase for the ordinary (n_o) and extraordinary (n_e) refractive indices. Such a difference induces spatial birefringence in the plane perpendicular to the propagation direction. Therefore the state of the polarization will change in the plane where the guided mode spatially is located. Results indicate increase in the rate of change of polarization state as radial and azimuthal in the propagation direction.

Keywords: Channel waveguide, Integrated optics, Lithium Niobate, Polarization.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

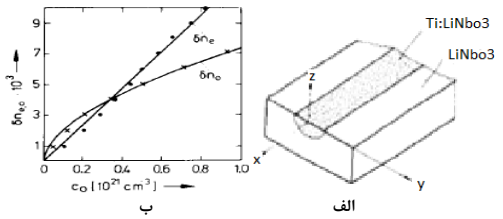
۱- مقدمه

رفتار موضعی قطبش باریکه‌ی نوری و تغییرات آن در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه بوده است، به نظر می‌رسد با کنترل این رفتار می‌توان تکانه‌ی زاویه‌ای اسپینی و مداری را کنترل کرد [۱]. تاکنون بررسی این رفتار در یک موجبر به عنوان پایه و اساس علم فوتونیک مجتمع صورت نگرفته است. بلور لیتیوم نایوبایت یک بلور دو شکستی است. نفوذ تیتانیوم در این بلور باعث افزایش ضرایب شکست عادی n_o و غیرعادی n_e آن می‌شود. بنابراین موجبر بوجود آمده توانایی هدایت هر دو مُد عمود بر هم TM و TE را داراست. شکل ۱- الف تغییرات ضرایب شکست عادی و غیرعادی را بر حسب غلظت تیتانیوم نفوذ کرده نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود رفتار دوشکستی در سطح مقطع موجبر ایجاد می‌شود [۲]. بنابراین قطبش مُد نوری هدایت شده در موجبر متأثر از دوشکستی موجود در سطح مقطع موجبر بصورت موضعی تغییر خواهد کرد. در این مقاله رفتار موضعی قطبش در امتداد شعاع و جهت سمتی مُد هدایت شده در موجبر کانالی بصورت نظری مطالعه شده است.

در قسمت مبانی نظری نحوه‌ی نفوذ تیتانیوم در بلور لیتیوم نایوبایت به اختصار توضیح داده شده است. نتایج حاصل از حل مسأله شامل نمودار توزیع تغییرات ضرایب شکست عادی و غیرعادی بر حسب عمق نفوذ در قسمت نتایج گنجانده شده است. تغییرات موضعی قطبش مُد انتشاری در موجبر، همچنین جهت‌گیری بیضی‌های قطبش در فواصل انتشاری مختلف در یک موجبر کانالی استوانه‌ای (که برای سادگی مسئله فرض می‌شود) و غیر استوانه‌ای به ترتیب در قسمت نتایج آمده است. در نهایت مقاله با جمع‌بندی موضوع به پایان می‌رسد.

۲- مبانی نظری

شکل ۱- ب شمایی از موجبر کانالی ساخته شده به روش نفوذ تیتانیوم در بلور لیتیوم نایوبایت z برش یافته را نشان می‌دهد. مُد هدایت شده در جهت x- منتشر می‌شود. روش ساخت به تفصیل در مرجع [۳] توضیح داده شده است. نفوذ تیتانیوم در بلور باعث افزایش هر دو ضریب شکست می‌شود، بنابراین موجبر هر دو مد عمود بر هم TM و TE را هدایت می‌کند.



شکل ۱: (الف) موجبر کانالی که با استفاده از روش نفوذ تیتانیوم در بلور لیتیوم نایوبایت z برش یافته ساخته می‌شود. x- جهت انتشار مد هدایت شونده را نشان می‌دهد. (ب) تغییرات ضرایب شکست عادی n_o و غیرعادی n_e بر حسب غلظت تیتانیوم نفوذ کرده در موجبر کانالی [۲].

سرعت‌های نفوذ متفاوت تیتانیوم در دو جهت عادی و غیرعادی بلور باعث شیب تغییرات متفاوت ضرایب شکست عادی n_o و غیرعادی n_e می‌شود. تغییرات ضرایب شکست از رابطه‌ی (۱) پیروی می‌کند [۲].

$$\delta n_i(\lambda, c) = d_i(\lambda) f_i(c) \qquad i = \mathrm{o,e} \qquad (۱)$$

که در آن

$$f_e(c) = \mathrm{E}c \ , \ f_o(c) = (\mathrm{F}c)^{\gamma}$$
$$d_e(\lambda) = \frac{0.839(\lambda/\mu\mathrm{m})^2}{(\lambda/\mu\mathrm{m})^2 - 0.0645} \qquad (۲)$$
$$d_o(\lambda) = \frac{0.67(\lambda/\mu\mathrm{m})^2}{(\lambda/\mu\mathrm{m})^2 - 0.13}$$

و $\mathrm{E} = 1.2\times10^{-23}\mathrm{cm}^3, \mathrm{F} = 1.3\times10^{-25}\mathrm{cm}^3, \gamma = 0.55$.

همچنین c غلظت موضعی تیتانیوم نفوذ یافته می‌باشد و از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$c(x, y) = c_0 f(u) g(s) \qquad (۳)$$

که

$$f(u) = \exp(-u^2) \qquad (۴)$$

در رابطه بالا $u = z/D_z$ و $s = 2y/w$ مختصات بهنجار شده هستند. D_y و D_z عمق‌های نفوذ در راستاهای عرضی هستند. همچنین W پهنای لایه‌ی تیتانیوم قبل از نفوذ است. c_0 پارامتری است که به تعداد کل یون‌های تیتانیوم موجود در واحد طول در جهت x مربوط می‌شود. با درنظر گرفتن وزن اتمی و چگالی حجمی یون تیتانیوم می‌توان c_0 را از طریق رابطه‌ی زیر به ضخامت لایه‌ی تیتانیوم قبل از نفوذ، τ ، مربوط کرد:

$$\tau = \mathrm{a}c_0 D_z \qquad (۵)$$
$$\mathrm{a} = 1.57\times10^{-23}\ \mathrm{cm}^3$$

در این مقاله برای یافتن میدان الکتریکی مُدهای هدایت شده از رهیافت شبه تحلیلی بر اساس روش ضریب شکست مؤثر [۲] استفاده شده است. بنابر این روش،

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

توزیع میدان الکتریکی مُدهای هدایت شده درون موجبر از رابطه‌ی زیر پیروی می‌کنند:

$$\Phi(s,u) = \mathrm{N}_{pq} Y_p(s) Z_q(u) = \mathrm{N}_{pq} (\cosh \kappa s)^{\mu} \times C_p^{\mu}(-\mathrm{i}\sinh\kappa s)(\cosh \eta u)^{\mu'} C_{2q+1}^{\mu'}(-\mathrm{i}\sinh\eta u) \quad (۶)$$

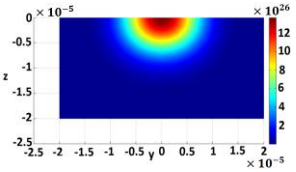
که در آن $Y_p(s)$ و $Z_q(u)$ توابع توزیع عرضی میدان به ترتیب در راستاهای y و z ، N_{pq} ثابت بهنجارش، p و q بیانگر مرتبه‌ی مُدهای هدایت شده توسط موجبر هستند. κ، μ، μ' و η پارامترهایی هستند که از برازش روابط موجود در این رهیافت حاصل می‌شوند. $C_n^m(x)$ نیز چندجمله‌ای گگن‌بائر (Gegenbauer) است. از آنجایی که هر نقطه از موجبر ضریب شکست خاص خود را دارد، رابطه‌ی مناسب میدان انتشاری در موجبر بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\phi(s,u,z) = \phi(s,u)\exp(\mathrm{i}\beta z)\exp(\mathrm{i}k_0\delta n) \quad (۷)$$

در رابطه بالا $\beta = k_0 N_{\mathrm{eff}}$ ضریب انتشار، N_{eff} ضریب شکست مؤثر هر مُد، k_0 عدد موج در خلأ و δn تغییرات ضریب شکست به واسطه‌ی نفوذ تیتانیوم است.

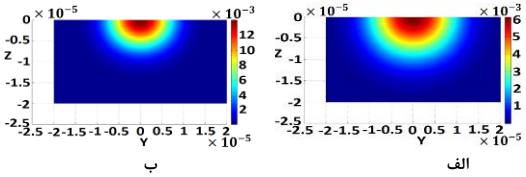
۳- نتایج

شکل۲ توزیع عرضی غلظت تیتانیوم نفوذ کرده را با شرایط نفوذ T=۱۰۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۷ ساعت نشان می‌دهد. ضخامت و عرض لایه‌ی تیتانیوم نشانده شده روی بلور به ترتیب ۱۸۰ نانومتر و ۱۰ میکرومتر فرض شده است.



شکل ۲: توزیع عرضی غلظت تیتانیوم در موجبر کانالی با شرایط نفوذ T=۱۰۵۰°C، t=۱۷h، τ=۱۸۰nm، W=۱۰μ.

شکل ۳ توزیع ضریب شکست عادی n_o و غیرعادی n_e را برای موجبر کانالی مورد مطالعه نشان می‌دهند.

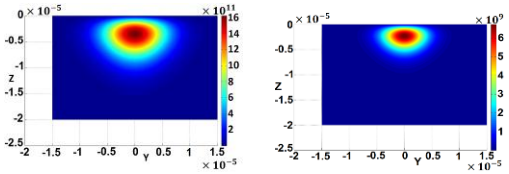


ب الف

شکل ۳: توزیع ضریب شکست عادی (الف) و غیرعادی (ب) در سطح مقطع موجبر کانالی با همان شرایط نفوذ.

با توجه به وابستگی متفاوت تغییرات ضریب شکست عادی و غیرعادی به غلظت تیتانیوم نفوذ کرده توزیع ضرایب شکست عادی و غیرعادی با هم متفاوت هستند.

شکل ۴ توزیع میدان الکتریکی مدهای پایه‌ی قابل انتشار در این موجبر را نشان می‌دهد.



ب الف

شکل ۴: توزیع میدان الکتریکی مد TM_{00}(الف) و TE_{00}(ب) در موجبر کانالی با همان شرایط نفوذ.

با فرض اینکه میدان نوری ارسال شده به موجبر بتواند هر دو مُد پایه TM_{00}و TE_{00} را برانگیخته کند (قطبش خطی ۴۵ درجه نسبت به دو امتداد قطبش TM و TE)، می‌توان رفتار قطبش را به صورت موضعی بر روی سطح مقطع میدان نوری بررسی کرد. برای این منظور میدان-های الکتریکی توسط رابطه‌ی (۸) توصیف خواهند شد. در سمت راست این رابطه، $TE(y,z)$ و $TM(y,z)$ بیانگر توزیع عرضی میدان‌هاست که در واقع همان توابع گگن‌بائر هستند. اکنون با در دست داشتن توزیع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در هر نقطه و با جایگذاری آن‌ها

$$TM(x,y,z) = TM(y,z)\exp(\mathrm{i}(\beta_2 + \frac{2\pi}{\lambda}(\delta n_e))x)$$
$$TE(x,y,z) = TE(y,z)\exp(\mathrm{i}(\beta_1 + \frac{2\pi}{\lambda}(\delta n_o))x) \quad (۸)$$

در رابطه‌ی (۹) می‌توان بیضویت و جهت‌گیری بیضی‌های قطبش را بصورت موضعی بررسی کرد [۴].

$$\sin(2\arctan e) = \frac{2\mathrm{Im}(\chi)}{1+|\chi|^2}$$
$$\tan(2\psi) = \frac{2\mathrm{Re}(\chi)}{1-|\chi|^2} \quad (۹)$$

e نوع قطبش (بیضوی، دایروی، ...) و ψ جهت گیری بیضی قطبش است (راست‌گرد یا چپ‌گرد)، کمیت χ بیانگر تغییر موضعی قطبش بوده و بصورت زیر تعریف می‌شود:

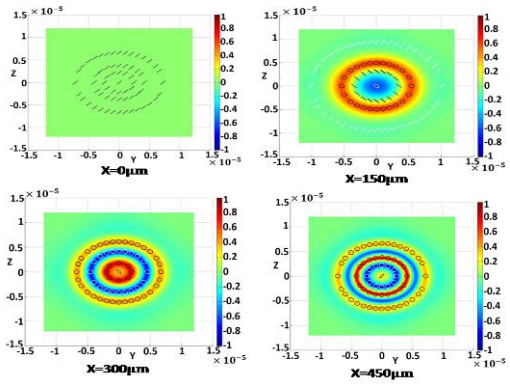
$$\chi = \frac{TM(y,z)}{TE(y,z)} \quad (۱۰)$$

۳-۱- موجبر کانالی استوانه‌ای

شکل ۵ توزیع عرضی بیضویت در فواصل انتشاری مختلف از موجبر کانالی را نشان می‌دهد. در این شکل علاوه بر توزیع بیضویت، بیضی‌های قطبش متناظر بر بیضویت در فواصل انتشاری مختلف آمده است. به علت توزیع متقارن تیتانیوم نفوذ کرده در بلور لیتیوم نایوبایت، توزیع تغییرات

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

ضرایب شکست و توزیع میدان‌های نوری متقارن خواهد بود. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، علیرغم توزیع متقارن تیتانیوم توزیع بیضویت در نقاطی کاملا

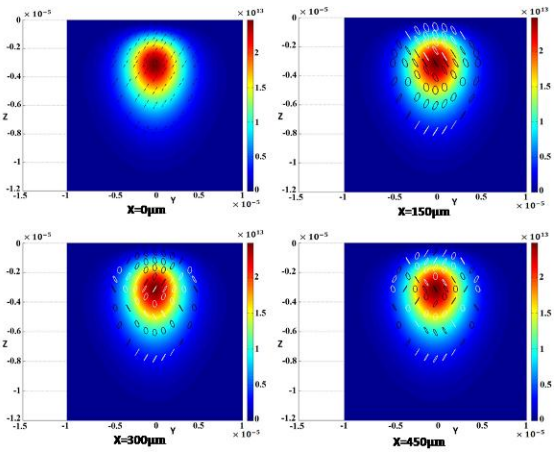


شکل ۵: توزیع عرضی بیضویت بیضی‌های قطبش همراه با بیضی‌های قطبش متناظر بر بیضویت در فواصل انتشاری مختلف از موجبر کانالی. بیضی‌های سیاه (سفید) نمایانگر قطبش راستگرد (چپ‌گرد) هستند، خطوط سیاه به صورت خط نقطه (۰-۰) نیز بیانگر قطبش خطی ۴۵ درجه است.

نامتقارن است. همچنین با افزایش مقدار فاصله‌ی انتشاری در موجبر تغییرات بیضویت در راستای شعاعی بیشتر می‌شود.

۳-۲- موجبر کانالی

شکل ۶ توزیع شدت مد قابل هدایت (میدان نوری شامل مدهای TM_{00} و TE_{00} با قطبش ۴۵ درجه) را در یک موجبر کانالی نشان می‌دهد.



شکل ۶: توزیع شدت میدان نوری شامل مدهای TM_{00} و TE_{00} با قطبش ۴۵ درجه همراه با بیضی‌های قطبش متناظر در فواصل انتشاری مختلف از موجبر کانالی. بیضی‌های سیاه (سفید) نمایانگر قطبش راستگرد (چپ‌گرد) هستند، خطوط سیاه به صورت خط نقطه (۰-۰) نیز بیانگر قطبش خطی ۴۵ درجه است.

در این شکل علاوه بر توزیع شدت، بیضی‌های قطبش متناظر بر بیضویت در فواصل انتشاری مختلف مشاهده می‌شود. در این موجبر هیچ نظمی در بیضویت و جهت‌گیری بیضی‌ها دیده نشده و این بی‌نظمی با انتشار بیشتر مد در موجبر بیشتر می‌شود.

۴- جمع‌بندی

در این مقاله تغییرات موضعی قطبش در سطح مقطع مُد هدایت شده در یک موجبر ساخته شده به روش نفوذ تیتانیوم در بستر بلور لیتیوم نایوبایت بصورت نظری بررسی شده است. نشان داده شد که توزیع و جهت‌گیری بیضی‌های قطبش مُد هدایت شده در موجبر در امتداد شعاع تغییر می‌کند. همچنین با انتشار بیشتر مُد نوری هدایت شده در موجبر، میزان تغییر جهت‌گیری و بیضویت بیضی‌های قطبش در راستای شعاع بیشتر می‌شود.

مشاهده شد که در یک موجبر کانالی بیضویت بیضی‌های قطبش در راستای سمتی تغییر می‌کند. از طرفی تغییر موضعی قطبش در امتداد شعاع و نسبت به زاویه‌ی سمتی می‌تواند به ترتیب حاوی تکانه‌ی زاویه‌ای اسپینی [۵] و تکانه‌ی زاویه‌ای مداری [1] باشد. در نتیجه انتظار داریم که این باریکه نیز تکانه‌ی زاویه‌ای اسپینی و تکانه‌ی زاویه‌ای مداری حمل کند.

۵- مراجع

[1] Giovanni Milione, H. I. Sztul, D. A. Nolanand R. R. Alfano, "*Higher-Order Poincare´ Sphere, Stokes Parameters, and the Angular Momentum of Light*", Phys. Rev. Lett. 107, 053601 (2011).

[2] E. Strake, G.P. Bava, I. Montrosset, "*Guided Modes of Ti:LiNbO$_3$ Channel Waveguides: A Novel Quasi-AnalyticalTechnique in Comparison with the Scalar Finite-Element Method*", Journal of Lightwave Technology, Vol.6, No. 6, 1988.

[3] G. Schreiber, H. Suche, Y. L. Lee, W. Grundkötter, V.Quiring, R. Ricken, and W. Sohler, "*Efficientcascaded difference frequency conversion in periodically poled Ti:LiNbO3 waveguides using pulsed and cw pumping*", Applied Physics B, Special Issue on Integrated Optics, vol. 73, 501-504, 2001.

[4] H. Tang, L. Chen, W. She, "*The spatially varying polarization of a focused Guassian beam in quasi-pahse-matched superlattice under electro-optic effect*", Optics Express, Vol. 18, No. 24, 2010.

[5] M. V. Berry, "*Paraxial beams of spinning light*", in Singularoptics, (Ed, M. S. Soskin) SPIE, Vol. 3487, N0. 6, 1998.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]