

تعیین ضریب الکترواپتیک مؤثر موجبر کانالی ساخته شده در بستر بلور لیتیوم نایوبیت قطبیده دوره‌ای

پگاه ده‌بزرگی^۱، نسرين معینی^۲ و رحمان نوروزی^۱

- ۱- دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان
- ۲- دبیر فیزیک آموزش و پرورش ناحیه دو زنجان

چکیده - ضریب الکترواپتیک مؤثر موجبر کانالی Ti:PPLN با روشی غیر مخرب اندازه‌گیری شده است. با نشان دادن دو الکتروود در طرفین موجبر می‌توان از آن به عنوان مبدل قطبش استفاده نمود. مبدل قطبش به سبب سطوح صیقلی ابتدایی و انتهایمانند یک تشدیدگر ضعیف فابری - پرو با آینه‌های ۱۳٪ بازتاب عمل می‌کند. با استفاده از اختلاف فاز ناشی از دو چینش متفاوت (ورود باریکه‌ی نور از دو جهت مختلف) می‌توان ضریب الکترواپتیک مؤثر موجبر کانالی Ti:PPLN را اندازه‌گیری کرد. بر پایه این روش، ضریب الکترواپتیک مؤثر r_{51} برابر 29.45 ± 2.6 پیکومتر بر ولت برای موجبر کانالی Ti:PPLN به طول ۱۵ میلی‌متر بدست آمد.

کلیدواژه - ضریب الکترواپتیک، مبدل قطبش، موجبر کانالی، لیتیوم نایوبیت قطبیده دوره‌ای.

Determination of effective electro-optic coefficient of Ti:PPLN channel waveguide

Pegah Dehbozorgi¹, Nasrin Moeini² and Rahman Nouroozi¹

- 1- Physics Departement, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan
- 2- Physics Teacher, the 2 regional Zanjan administration of education and training

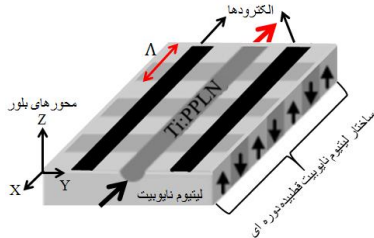
Abstract- The effective electro-optic coefficient of a Ti:PPLN channel waveguide is measured using a non-destructive method. With electrodes coated in the both sides of the channel guide a polarization converter was made. Since both end facets of the waveguide is polished, it acts as a weak Fabry-Perot resonator with about 13% reflectivity in both ends. The phase difference resulting from two different arrangements (entry of light beam from two opposite directions) one can measure the effective electro-optic coefficient of the Ti:PPLN channel guide. Based on this method, the effective electro-optic coefficient $r_{51} = 29.45 \pm 2.6$ (pm/v) is reported using a 15 mm long Ti:PPLN channel waveguide.

Keywords: channel waveguide, electro-optic coefficient, polarization converter, periodically poled lithium niobate.

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

۱- مقدمه

موجبر کانالی Ti:PPLN استفاده می‌شود. مبدل قطبش متشکل از یک موجبر Ti:PPLN است. به سبب الکترو-هایی که در طرفین موجبر و به موازات آن نشانده می‌شوند می‌توان میدان الکتریکی در جهت غالب Y به آن اعمال کرد. شکل ۱ شمایی از ساختار کلی یک مبدل قطبش با استفاده از موجبر Ti:PPLN را نشان می‌دهد.



شکل ۱: ساختار مبدل الکتروپتیکی قطبش با استفاده از موجبر Ti:PPLN. بستر با طول تناوب Λ قطبیده شده است. مبدل توانایی تبدیل پرتو ورودی با قطبش خطی عمود بر (موازی با) صفحه بلور TM به قطبش خطی موازی با (عمود بر) صفحه بلور TE را در حضور میدان الکتریکی خارجی اعمالی در جهت غالب Y داراست.

چنانچه مد ورودی به موجبر TM_{00} (مد پایه با قطبش خطی عمود بر سطح بلور) در نظر گرفته شود، با استفاده از خاصیت الکتروپتیکی بلور لیتیم نایوبیت این مد می‌تواند به مد TE_{00} (مد پایه با قطبش خطی موازی بر سطح بلور) تبدیل شود. معادلات جفت شده برای دامنه میدان الکتریکی مدهای هدایت شونده TE_{00} و TM_{00} که توصیف کننده‌ی تبدیل قطبش $TE_{00} \leftrightarrow TM_{00}$ می‌باشند به صورت روابط (۱) هستند.

$$\frac{dA_{TM_{00}}}{dx} = -i\kappa A_{TE_{00}} e^{i\Delta\beta x} \quad (1)$$

$$\frac{dA_{TE_{00}}}{dx} = -i\kappa A_{TM_{00}} e^{-i\Delta\beta x}$$

در روابط بالا $A_{TE_{00}}$ و $A_{TM_{00}}$ به ترتیب دامنه میدان الکتریکی مدهای TE_{00} و TM_{00} ، $\Delta\beta = \frac{2\pi(n_{TM_{00}} - n_{TE_{00}})}{\lambda} - k_m$ ، اختلاف تکانه‌های خطی و $n_{TE_{00}}$ و $n_{TM_{00}}$ ضرایب شکست مدهای TE_{00} و TM_{00} هستند. $k_m = \frac{2\pi m}{\Lambda}$ بردار موج توری شبه تطابق فاز ثبت شده در بلور لیتیم نایوبیت است. $\Lambda = 2l_c$ طول تناوب، l_c طول همدوسی و m مراتب توری را مشخص می‌کنند. راه نوری که طی آن اختلاف فاز بین مدهای انتشاری TE_{00} و TM_{00} برابر π می‌شود را طول همدوسی l_c گویند. تابع توری شبه تطابق فاز $d(z)$ با رابطه (۲) توصیف می‌شود.

ادوات ساخته شده از بلورهای دارای خاصیت الکتروپتیکی کاربردهای فراوانی در صنعت اپتیک دارند. در این میان بلور الکتروپتیکی و فروالکتریک لیتیم نایوبیت به سبب تجمع ویژگی‌های منحصر به فردی از قبیل تهیه آسان، استحکام، شفافیت در ناحیه فروسرخ دور تا فرابنفش، امکان تغییر قطبش ذاتی بلور و همچنین خاصیت الکتروپتیکی و غیرخطی مرتبه دوم همواره مورد توجه بوده‌است. این بلور در گستره‌ی وسیعی در ساخت ادوات نوری صنعت مخابرات به عنوان مدولاتور گرفته تا کاربرد در لیزرهای تپ کوتاه به عنوان کلیدزنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین با در نظر گرفتن خاصیت فروالکتریک، بلور لیتیم نایوبیت توانایی تغییر قطبش خودبه‌خودی را با اعمال میدان الکتریکی خارجی داراست. با استفاده از این خاصیت به‌منظور تطابق فاز برای ادوات الکتروپتیکی و غیرخطی ساخته شده از این بلور استفاده شده است. این ادوات بر پایه تغییر دوره‌های قطبش خودبخودی بلور استوار است. از آنجاییکه محور نوری بلور با جهت قطبش خودبه‌خودی بلور هم‌راستا است، ضریب الکتروپتیک و ضریب غیرخطی در جهت محور نوری نیز تحت این شرایط بصورت دوره‌ای تغییر می‌کند [۱]. این ساختار لیتیم نایوبیت قطبیده‌ی دوره‌ای نام دارد که در شکل ۱ شمایی از آن با طول تناوب Λ نشان داده شده‌است.

به‌منظور استفاده از این بلور در مدارهای مجتمع نوری، روش‌های گوناگون ساخت موجبر در بستر این بلور توسعه یافته‌است. موجبرهای کانالی ساخته‌شده به روش نفوذ تیتانیوم به سبب اتلاف بسیار کم (تا 0.3 دسی‌بل در هر سانتی‌متر حتی در موجبرهای بلند تا حدود 10 سانتی‌متر [۲])، قابلیت انتشار مدهای نوری با قطبش دلخواه و عدم تخریب خواص اپتیکی بلور بستر در حین ساخت، کاربرد-های بیشتری نسبت به سایر روش‌ها پیدا کرده‌اند.

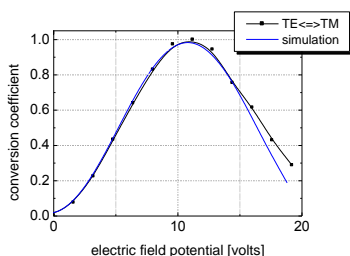
با توجه به خواص برجسته بلور لیتیم نایوبیت و کاربرد گسترده آن در صنعت مخابرات نوری، آگاهی از مقدار ضریب الکتروپتیک مؤثر موجبر کانالی ساخته شده در بستر بلور موضوعی مهم و ضروری به‌شمار می‌رود. در این مقاله روشی برای اندازه‌گیری ضریب الکتروپتیک مؤثر موجبر کانالی Ti:PPLN ارائه شده‌است. در این روش از یک مبدل قطبش الکتروپتیکی ساخته شده در یک

ثبت می‌شود.

بهره‌ی تبدیل قطبش طبق رابطه (۴) تابعی سینوسی و متناسب با میدان الکتریکی اعمالی به موجبر کانالی است [۴].

$$\eta(l) = \sin^2(|\kappa|l) \quad (4)$$

نتایج حاصل از شبیه‌سازی [۴] نشان دهنده‌ی تبدیل کامل دو مُد قطبش $TE_{00} \leftrightarrow TM_{00}$ در اختلاف پتانسیل الکتریکی برابر با ۱۱/۴۵ ولت است. این نتایج همخوانی خوبی با اختلاف پتانسیل الکتریکی اندازه‌گیری شده‌ی ۱۲ ولتی دارد. شکل ۳ بهره‌ی تبدیل قطبش اندازه‌گیری شده (نقطه خط مشکی) و شبیه‌سازی شده (خط آبی) بر حسب اختلاف پتانسیل الکتریکی اعمالی به دو الکتروُد را نشان می‌دهد.



شکل ۳: بهره‌ی تبدیل قطبش دو مُد TE_{00} و TM_{00} اندازه‌گیری شده (نقطه خط مشکی) و شبیه‌سازی شده (خط آبی) بر حسب اختلاف پتانسیل الکتریکی اعمالی.

به منظور کاهش اتلاف ناشی از پراکندگی نور در هنگام ورود به موجبر، سطوح ابتدایی و انتهایی موجبر را باید صیقل داد. این کار سبب می‌شود که دو سطح ابتدا و انتهای موجبر مانند آینه‌ی ضعیف عمل کنند و موجبر مورد نظر به یک تشدیدگر ضعیف فابری-پرو با بازتاب ۱۳٪ از ابتدا و انتهای موجبر تبدیل شود. نکته قابل توجه اینکه به سبب فرآیند صیقل‌کاری، طول تمام‌شده‌ی نیم دوره‌های تناوب ابتدایی l_f و انتهایی l_r کمی کمتر از طول همدوسی l_c خواهد شد. در مبدل قطبش به کار رفته اندازه نیم‌طول تناوب ابتدایی و انتهایی بعد از فرآیند صیقل‌کاری به ترتیب ۱۰ و ۶/۵ میکرومتر اندازه‌گیری شده‌اند. این تفاوت در طول موجب ایجاد اختلاف فاز مُد نوری انتشاری در موجبر پس از بازتاب ۱۳٪ از دو انتهای موجبر است. بسته به اینکه مُد ورودی TM_{00} از کدام وجه به موجبر وارد شود، اختلاف فازهای متفاوتی را تجربه خواهد کرد. اختلاف فاز ایجاد شده به نوبه‌ی خود باعث جابه‌جایی طول موج تشدیدی خروجی از مبدل قطبش خواهد شد

$$d(z) = \sum_m G_m \exp\left(\frac{-i2m\pi}{\Lambda} r_{51}\right) r_{51} \quad (2)$$

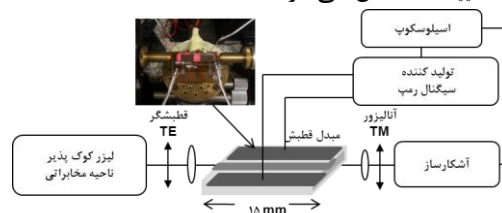
G_m ثابت‌های سری فوریه هستند [۳]. همچنین تغییرات ضریب الکترواپتیکی r_{51} نیز با استفاده از رابطه (۲) و به صورت $r_{51} = r_{51} d(z)$ تعریف می‌شود. κ ضریب جفت-شدگی میان مُدهای TE_{00} و TM_{00} است که از رابطه زیر بدست می‌آید [۳]:

$$\kappa = \frac{2}{\lambda_0} \frac{n_{o,eff}^2 n_{e,eff}^2 r_{51} |E_y|}{\sqrt{n_{o,eff} n_{e,eff}}} g \quad (3)$$

$n_{o,eff}$ و $n_{e,eff}$ به ترتیب ضرایب شکست غیرعادی و عادی موجبر در بستر بلور لیتیوم نایوبیت هستند. E_y دامنه میدان الکتریکی اعمالی خارجی و g انتگرال هم‌پوشانی میان میدان‌های الکتریکی مُدهای هدایت‌شونده و اعمالی خارجی است [۳].

۲- روش اندازه‌گیری ضریب مؤثر الکترواپتیکی

مبدل قطبش موجبری به طول ۱۵ میلی‌متر و پهنای ۶ میکرومتر برای تبدیل قطبش در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر موجود است. با توجه به طول موج ذکر شده طول تناوب $\Lambda = 21$ میکرومتر برای مبدل قطبش بکار رفته است. دو الکتروُد نشانده شده به فاصله ۱۰ میکرومتر از یکدیگر در دو طرف موجبر و موازی با آن، جهت اعمال میدان الکتریکی خارجی نشانده شده‌اند. با اعمال اختلاف پتانسیل الکتریکی ۷ ولت به الکتروُد‌ها و با استفاده از خاصیت الکترواپتیکی (روابط ۱ تا ۳) مُد TM_{00} ورودی به مُد TE_{00} تبدیل می‌شود.



شکل ۲: شمایی از چیدمان آزمایش

شکل ۲ شمایی از چیدمان آزمایش را نشان می‌دهد. نور در محدوده‌ی طول موج مخابراتی یک لیزر کوک‌پذیر پس از عبور از یک قطبشگر و تولید نور با قطبش خطی و موازی سطح فوقانی مبدل قطبش (قطبش TE) توسط عدسی به آن جفت می‌شود. سیگنال ریمپی با دامنه ۱۸ ولت وظیفه اعمال میدان خارجی بین دو الکتروُد مبدل قطبش را بر عهده دارد. تغییرات قطبش نور پس از مبدل به‌واسطه‌ی یک آنالیزور و آشکارساز توسط اسیلوسکوپ

$$\varphi_{forward} = \frac{2\pi n_e}{\lambda_{forward}} L, \varphi_{backward} = \frac{2\pi n_e}{\lambda_{backward}} L$$

$$\Delta\varphi = (\varphi_{backward} - \varphi_{forward}) \quad (7)$$

$$= 2\pi n_e L \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{forward} \lambda_{backward}} \right)$$

در رابطه بالا $\lambda_{backward}$ ، $\lambda_{forward}$ ، $\varphi_{backward}$ ، $\varphi_{forward}$ به ترتیب بیانگر فاز و طول موج مدهای قطبش برای ورود نور در دو جهت متضاد به مبدل قطبش هستند. نمودار قابل محاسبه است. مقدار به دست آمده از اندازه-گیری‌ها برای ضریب الکترواپتیک مؤثر تشدیدگر موجبری Ti:PPLN با مشخصات ذکرشده در بازه طول موجی $1548/4 - 1551/7$ نانومتر برابر $29/45 \pm 2/6$ پیکو متر بر ولت می‌باشد.

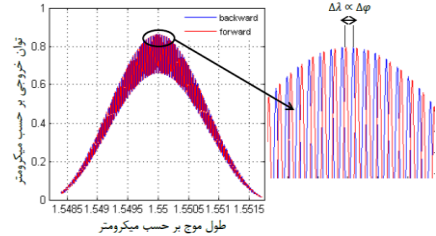
۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش غیر مخربی برای اندازه‌گیری ضریب الکترواپتیک مؤثر موجبر کانالی Ti:PPLN معرفی شده است. این روش می‌تواند به عنوان روشی مرجع برای اندازه‌گیری ضریب الکترواپتیک هر مدولاتور الکترواپتیکی در حین ساخت اعمال شده و گزارش شود. اساس روش ارائه شده بر پایه اختلاف فاز ناشی از طول‌های نابرابر نیم‌دوره‌های تناوب در دو انتهای موجبر به دلیل فرآیند صیقل‌کاری استوار است. با اندازه‌گیری این طول‌ها در دو انتها و توان خروجی از تشدیدگر موجبری در حالت بهره‌ی ۱۰۰٪، ضریب الکترواپتیک مؤثر r_{51} در طول موج 1550 نانومتر محاسبه و برابر $29/45 \pm 2/6$ پیکومتر بر ولت به دست آمد که تطابق خوبی با نتایج گزارش-شده تاکنون داراست [۶].

مراجع

- [۱] R. Nouroozi, "All optical wavelength conversion and parametric amplification in Ti: PPLN channel waveguides for telecommunication applications," Paderborn, Univ., Ph. D. Diss., 2010, 2010.
- [۲] Y. Xi, Q. Wang, Z. Wan, X. Zhang, Y. Lu, and N. Ming, "TE-TM mode converter based on PPLN waveguide," *Ferroelectrics*, vol. 253, pp. 201-208, 2001.
- [۳] G. Zheng, H. Wang, and W. She, "Wave coupling theory of quasi-phase-matched linear electro-optic effect," *Optics express*, vol. 14, pp. 5535-5540, 2006.
- [۴] E. Strake, G. P. Bava, I. Montrosset, "guided modes of Ti:LiNbO3 channel waveguides: A novel quasi-analytical technique in comparison with the scalar finite-element method," *J. Lightwave Technol.*, Vol. Lt-6, no. 6, p. 1126 (1988).
- [۵] R. W. Boyd, *Nonlinear optics*: Academic press, 2003.
- [۶] M. Alonzo, "Photonic devices in solitonic waveguides," Sapienza-Università di Roma, 2010.

(شکل ۴). با اندازه‌گیری جابه‌جایی طول موج منتج از دو منحنی، اختلاف فاز ناشی از طول‌های نابرابر و به دنبال آن ضریب شکست مؤثر موجبر کانالی Ti:PPLN قابل محاسبه است.



شکل ۴: منحنی توان خروجی از تشدیدگر برای مد ورودی TM_{00} . خطوط قرمز و آبی توان خروجی در دو چیدمان بیان‌شده در متن را نشان می‌دهند. تصویر بزرگ شده به منظور وضوح بیشتر از ناحیه مرکزی شکل است.

۲-۱- محاسبه ضریب الکترواپتیک مؤثر

با توجه به نحوه قرارگیری الکترودها روی سطح موجبر، میدان الکتریکی اعمالی در راستای محور Y است (ر.ک. به شکل ۱). بنابراین ضریب الکترواپتیک مؤثر قابل اندازه-گیری r_{51} می‌باشد. تغییر ضریب شکست در موجبر از رابطه (۵) به دست می‌آید [۵].

$$\Delta n_e = \frac{1}{2} n_e^3 r_{51} \frac{v}{d} \quad (5)$$

که در آن d فاصله ۱۰ میکرومتری الکترودها از یکدیگر است. با در نظر گرفتن راه نوری که هر مد انتشاری داخل موجبر طی می‌کند، می‌توان اختلاف فاز ناشی از طول‌های نابرابر ابتدا و انتهای موجبر را برای مد ورودی TM_{00} از رابطه زیر محاسبه کرد.

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left(n_e |l_f - l_r| + \frac{1}{2} r_{51} n_e^3 \frac{v}{d} L \right) \quad (6)$$

با توجه به معلوم بودن تمام پارامترها در رابطه (۷) شامل: λ طول موج مدهای قطبشی هدایت‌شونده، l_f و l_r به ترتیب طول نیم‌دوره‌های تناوب ابتدا و انتهای موجبر کانالی پس از صیقل‌کاری، L طول کل موجبر، v اختلاف پتانسیل الکتریکی اعمالی به الکترودها به فاصله d از هم و همچنین اختلاف فاز $\Delta\varphi$ که با توجه به رابطه (۷) به دست می‌آید، تنها مجهول باقی‌مانده که همان r_{51} است، قابل محاسبه است.