



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و  
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس  
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،  
دانشگاه شیراز،  
شیراز، ایران.  
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷



## بررسی و مدل سازی دمائی حسگر نوری ولتاژ بر پایه کریستال لیتیوم نایوبیت در دو راستای برش کریستالی متفاوت

حسام امیری<sup>۱</sup>، سکینه صدیقی بنابی<sup>۱</sup>، محمد اسماعیل زیبائی<sup>۲</sup>، ندا یآوری<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>پژوهشگاه نیرو، گروه ابزار دقیق - شهرک غرب، انتهای دادمان، تهران

<sup>۲</sup>پژوهشکده لیزر و پلاسما دانشگاه شهید بهشتی - اوین، بلوار دانشجو، تهران

چکیده - حسگر نوری ولتاژ با استفاده از کریستال لیتیوم نایوبیت در دو راستای برش  $z$  و انتشار  $y$  و همچنین برش  $x$  و انتشار  $z$ ، در بازه دمایی صفر تا ۱۰۰ درجه سانتی گراد مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. حسگر شبیه سازی شده بر پایه اثر پاکلز کریستال لیتیوم نایوبیت با برش  $x$  در راستای انتشار  $z$ ، در مقایسه با راستای برش  $z$  و انتشار  $y$ ، حساسیت دمایی کمتری دارد به طوری که تغییرات دمایی تابع تبدیل خروجی حسگر در این بازه دمایی بسیار ناچیز، خطی و از مرتبه  $10^{-4}$  است در صورتی که در راستای برش  $z$  و انتشار  $y$ ، این مقدار به شکل سینوسی با مرتبه ۱ تغییر می نماید. بنابراین استفاده از حسگر نوری ولتاژ بر پایه اثر پاکلز در کریستال لیتیوم نایوبیت در برش  $x$  در راستای انتشار  $z$ ، تغییرات دمایی معادل ۰.۰۱ درصد خواهد داشت که در مقایسه با نوع برش  $z$  و انتشار  $y$ ، بسیار پایدارتر خواهد بود.

کلید واژه- اثر پاکلز، دوشکستی، حسگر ولتاژ، لیتیوم نایوبیت.

## Investigation and Modelling of Optical Voltage Sensor Based on LiNbO<sub>3</sub> Crystal in Two Different cutting Directions

H. Amiri<sup>1</sup>, S. K. Sadighi<sup>1</sup>, M. I. Zibaii<sup>2</sup>, N. Yavari<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instrumentation Department, Niroo Research Institute, Dadman St, Tehran, Iran

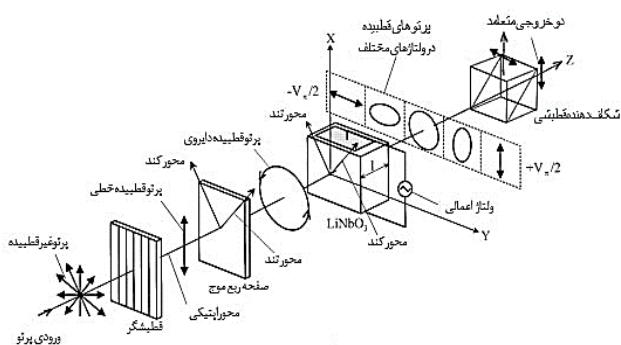
<sup>2</sup> Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract- A fiber-optic voltage sensor based on the transverse Pockels effect in the  $x$  and  $z$  cut LiNbO<sub>3</sub> crystals where the optical path was parallel to  $z$  and  $y$  axis, respectively, is defined and the outstanding temperature stability of within 0°C to 100°C is investigated in two directions. The simulated comparison between the temperature sensitivity of the sensor based on the Pockels effect in  $x$ -cut LiNbO<sub>3</sub> bulk crystal with optical path parallel to  $z$ -axis is less than the  $y$  propagated,  $z$ -cut LiNbO<sub>3</sub> crystal where the temperature variation of the transfer function in this temperature range is fractional, linear and in the order of  $10^{-4}$ . However, in the  $z$ -cut crystal Pockels cell the output of the sensor is sinusoidal and in the order of 1. Therefore, the use of a fiber-optic voltage sensor based on  $z$  propagated,  $x$ -cut LiNbO<sub>3</sub> crystal demonstrates temperature stability of  $\pm 0.01\%$  from 0°C to 100°C compared with the  $y$  propagated,  $z$ -cut bulk LiNbO<sub>3</sub> crystal.

Keywords: Voltage Sensor, Birefringence, Pockels Effect, Lithium Niobate Crystal.

## ۱- مقدمه

ایجاد دوشکستی پاکلز می‌شود. صفحه ربع موج خروجی را به نحوی بایاس می‌کند که پاسخ در قسمت خطی تابع مربع سینوس قرار گیرد. سپس نور وارد کریستال  $\text{LiNbO}_3$  در دو حالت برش  $Z$  و راستای انتشار  $Y$  و برش  $X$  و راستای انتشار  $Z$  می‌شود. نور خروجی از کریستال وارد شکاف دهنده قطبشی پرتو که به طور موازی با قطبش گر ورودی جهت‌گیری شده است و دو حالت قطبش متعامد را از هم جدا می‌کند می‌شود.



شکل ۱: ساختار شماتیکی سنسور اپتیکی ولتاژ

از شکاف دهنده قطبشی پرتو و یا آنالیزور برای تبدیل تغییرات حالت قطبشی به تغییرات شدت استفاده می‌شود. از شکاف دهنده قطبشی پرتو فرایند تفاضل روی مجموع سیگنال می‌توان برای کاهش نویز مد عمومی استفاده کرد. با استفاده از ماتریس جونز تابع تبدیل سنسور با استفاده از شکل (۱) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$I = |PBS \times M_{Crystal} \times R(-45^\circ) \times WP \times R(45^\circ) \times P \times E|^2 \quad (1)$$

به طوری که  $E$ ، بردار جونز برای نور ورودی،  $P$ ، ماتریس جونز قطبش گر ورودی،  $R(\dots)$ ، ماتریس دوران،  $WP$ ، ماتریس جونز صفحه ربع موج،  $M_{Crystal}$ ، ماتریس جونز کریستال  $\text{LiNbO}_3$  و  $PBS$ ، ماتریس جونز شکاف دهنده قطبشی پرتو می‌باشد. اختلاف فاز بین دو قطبش متعامد کند و تند برای این دو حالت برش  $Z$  در راستای انتشار  $Y$  و برش  $X$  در راستای انتشار  $Z$  به شکل زیر است:

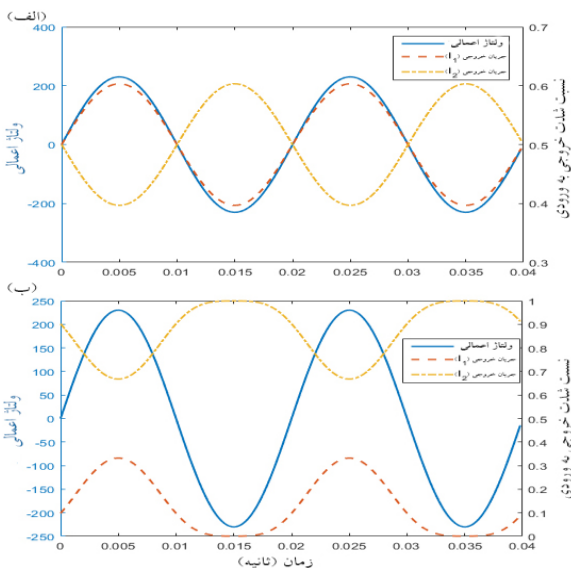
$$\Gamma_{x-cut} = \frac{2\pi l}{\lambda} \left( \frac{V}{d} n_o^3 r_{22} \right) \quad (2)$$

سنسور ولتاژ اپتیکی حجمی، تداخل مسیر مشترک بر پایه دوشکستی الکترواپتیکی مواد است و به سلول پاکلز معروف است [۱]. از سال ۱۹۷۰ شرکت‌های برقی مختلفی سلول پاکلز را برای اندازه‌گیری ولتاژ مورد استفاده قرار دادند [۲]. ضریب الکترواپتیکی کریستال‌های رایج ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ،  $\text{LiNbO}_3$  و  $\text{KD}_2\text{PO}_4$ ) کوچک است، بنابراین سلول پاکلز به طور نسبی حساسیت کمی دارد که برای آشکارسازی میدان‌های شدید مناسب است. کریستال  $\text{LiNbO}_3$  از مهم‌ترین بلورهای گروه کریستال‌های پاکلز متعلق به گروه نقطه‌ای ۳ است. این کریستال در طراحی موج‌برهای نوری، مدولاتورهای نوری و سایر کاربردهای خطی و غیرخطی اپتیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به راستای انتشار نور در کریستال و جهت اعمال میدان الکتریکی، بلور  $\text{LiNbO}_3$  با برش  $Z$  و راستای انتشار در جهت  $Y$  و برش  $X$  و انتشار در جهت  $Z$ ، برای ساخت سنسور استفاده می‌شود. ضرایب شکست وابسته به میدان الکتریکی در این دو راستا متفاوت است. با استفاده از تفاوت موجود در ضرایب شکست وابسته به میدان الکتریکی و ثابت بودن قسمت مستقل از میدان نتایج متفاوتی به دست می‌آید. در این مقاله به مقایسه سنسور ولتاژ اپتیکی حجیم با استفاده از اثر پاکلز در کریستال  $\text{LiNbO}_3$  با برش  $Z$  و راستای انتشار  $Y$  و برش  $X$  و راستای انتشار  $Z$  می‌پردازیم. همچنین وابستگی خروجی سنسور با استفاده از این دو برش کریستالی به تغییرات دمایی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- اساس عملکرد سنسور نوری ولتاژ

سنسور ولتاژ قطبش‌سنجی در هریک از مواد حجیم، موج‌بر و یا فیبرنوری مطابق شماتیک شکل ۱ یک ساختار ساده دارد. نور ساطع شده از SLD با طول موج ۱۳۱۰ نانومتر با قطبش خطی وارد صفحه ربع موج با زاویه ۴۵ درجه برای

دارد برش  $x$  و یا  $y$  کریستال با جهت انتشاری  $z$  است. شبیه‌سازی سنسور ولتاژ برای ابعاد کریستال  $10 \times 2 \times 2$  میلی‌متر مکعب و ولتاژ اعمالی  $220$  ولت انجام شده است. همان‌طور که در شکل ۲-الف مشاهده می‌شود خروجی سنسور برش در راستای  $x$  و انتشار در راستای  $z$  دارای شکل موج کاملاً سینوسی می‌باشد و در ولتاژهای بالاتر تا  $2$  کیلوولت شکل موج سینوسی باقی می‌ماند. اما مطابق شکل ۲-ب در برش راستای  $z$  و انتشار در راستای  $y$  خروجی سنسور در ولتاژ  $220$  ولت و بالاتر سینوسی نخواهد بود. در نتیجه سنسور برای ولتاژهای پایین مناسب است.



شکل ۲: شکل موج ولتاژ اعمال شده و خروجی سنسور: الف) برش  $x$  و انتشار در راستای  $z$  ب) برش  $z$  و انتشار در راستای  $y$

پیش‌بینی وابستگی خروجی سنسور به دما با استفاده از رابطه (۴) تا (۷) برای مقایسه دو دمای صفر و  $100$  درجه سانتی‌گراد در شکل ۳ نشان داده شده است. تغییرات دمایی ضرایب شکست، ضرایب الکترواپتیکی، ضرایب انبساط طولی و عرضی و تغییرات دوشکستی صفحه ربع مرتبه صفر در نظر گرفته شده است.

همچنین برای مقایسه بیشتر دو حالت کریستالی برش  $z$  با انتشار در راستای  $y$  و برش  $x$  در راستای  $z$ ، تغییرات  $T_{rms}$  خروجی و  $T_{peak-to-peak}$  در بازه دمایی صفر تا  $100$  درجه

$$\Gamma_{z-cut} = \frac{2\pi l}{\lambda} ((n_e - n_o) - \frac{V}{2d} (n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13})) \quad (3)$$

### ۳- نتایج مدل سازی دمائی سنسورنوری ولتاژ

بسیاری از پارامترهای رابطه (۱) به دما وابسته‌اند. بنابراین تغییرات دمایی در خروجی سنسور موثر است. برای محاسبه تغییرات ضریب شکست عادی و غیرعادی در کریستال  $\text{LiNbO}_3$  با دما می‌توان از معادله Sellmeier [۳] طبق رابطه (۴) استفاده کرد.

$$n^2 = A_1 + \frac{A_2 + B_1 F}{\lambda^2 - (A_3 + B_2 F)^2} + B_3 F - A_4 \lambda^2 \quad (4)$$

به طوری که:

$$F = (T - 24.5)(T + 570.5) \quad (5)$$

مقادیر  $T$ ، دما بر حسب درجه سانتی‌گراد و  $\lambda$ ، طول موج بر حسب نانومتر می‌باشد که ضرایب موجود در رابطه (۴) در مرجع [۴] می‌توان یافت. وابستگی دمایی ضریب الکترواپتیکی کریستال  $\text{LiNbO}_3$  در دو راستای برش  $z$  در راستای انتشار  $y$  و برش  $x$  در راستای انتشار در طول موج  $623$  نانومتر برابر با  $r_{33} = 4.9 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ ،  $r_{13} = 4.6 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$  و  $r_{22} \sim 0$  می‌باشد [۳-۴]. وابستگی دمایی تغییرات طولی و عرضی کریستال به ترتیب برابر با  $\alpha_a = 15.4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  و  $\alpha_c = 7.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  می‌باشد [۵]. همچنین دوشکستی خطی صفحه ربع مرتبه صفر نیز به دما وابسته است و برابر با  $\gamma = -1.7 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$  می‌باشد.

سنسور توصیف شده در شکل ۱ برای مقایسه دو حالت برش  $z$  در راستای انتشار  $y$  و برش  $x$  در راستای انتشار  $z$ ، توسط رابطه (۱) شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی تغییرات ضرایب شکست با دما در بازه دمایی  $0$  تا  $300$  نشان می‌دهد که تغییرات ضریب شکست عادی  $n_o$  از مرتبه  $10^{-3}$  و ضریب شکست غیرعادی  $n_e$  از مرتبه  $10^{-3}$  تا  $10^{-3}$  می‌باشد. بنابراین بایستی برای کاهش تاثیرات دمایی در طراحی سنسور کریستال را در جهتی استفاده کرد که ضریب شکست غیرعادی  $n_e$  موثر نباشد و تنها ضریب شکست عادی بر دوشکستی تاثیر گذارد. جهت کریستالی که این ویژگی را

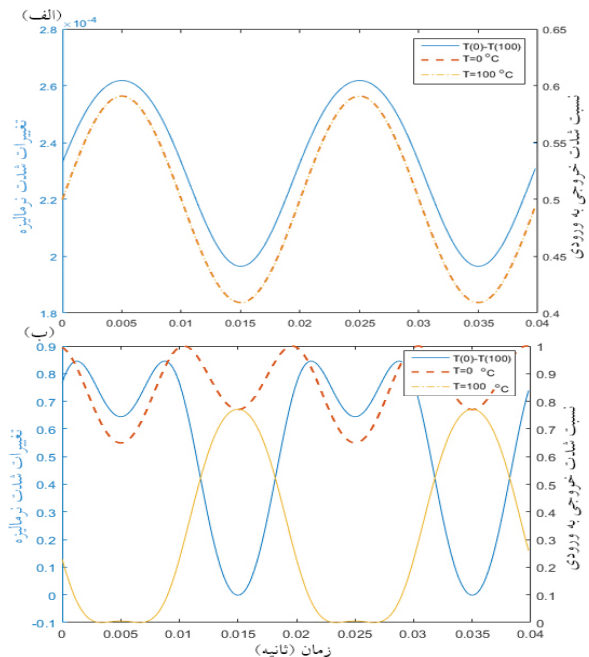
#### ۴- نتیجه گیری

حسگر نوری ولتاژ با استفاده از کریستال  $\text{LiNbO}_3$  در دو راستای برش  $Z$  و انتشار  $Y$  و همچنین برش  $X$  و انتشار  $Z$ ، در بازه دمایی صفر تا  $100^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. در برش  $Z$  هر دو ضریب شکست عادی و غیرعادی در تاخیر فازی ناشی از کریستال موثر هستند در صورتی که در برش  $X$  و انتشار  $Z$ ، تنها ضریب شکست عادی تاثیرگذار است. همچنین تغییرات دمایی ضریب الکترواپتیکی در برش  $X$  و انتشار  $Z$ ، تقریباً صفر است بنابراین این نوع سنسور در مقایسه با جهت برش  $Z$  و انتشار  $Y$ ، حساسیت دمایی کمتری دارد به طوری که تغییرات  $T_{rms}$  و  $T_{peak-to-peak}$  در بازه دمایی صفر تا  $100^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد بسیار ناچیز، خطی و از مرتبه  $10^{-4}$  است در صورتی که  $T_{rms}$  و  $T_{peak-to-peak}$  برش  $Z$  و انتشار در راستای  $Y$ ، به شکل سینوسی و با مرتبه ۱ در این بازه دمایی با دوره تناوب ۲۰ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌نماید. در نتیجه سنسور ولتاژ اپتیکی بر پایه اثر پاکلز در کریستال  $\text{LiNbO}_3$  در برش  $X$  در راستای انتشار  $Z$ ، در مقایسه با نوع برش  $Z$  و انتشار  $Y$ ، بسیار پایدارتر بوده و تغییرات دمایی برابر با  $0.1\%$  خواهد داشت.

#### مرجع ها

- [1] K. Hidaka, "Progress in Japan of space charge field measurement in gaseous dielectrics using a Pockels sensor," IEEE Electr. Insul. Mag, vol. 12, p. 17-28, 1996.
- [2] T. Mitsui, K. Hosoe, H. Usami, S. Miyamoto, "Development of Fiber-Optic Voltage Sensors and Magnetic-Field Sensors," IEEE Transactions on Power Delivery, Vols. PWRD-2, pp. 87-93, 1987.
- [3] G. Kotitz "properties of Lithium Niobate," EMIS Data Reviews Series No. 5, 1989.
- [4] J. D. Zook, D. Chen and G. N. Otto, "Temperature dependence and model of the electrooptic effect in  $\text{LiNbO}_3$ ," Applied Physics Letters, vol. 11, pp. 159-161, 1967.
- [5] K. K. Wong, Properties of Lithium Niobate, London: INSPEC, The Institution of Electrical Engineers, 2002.

سانتی‌گراد در شکل ۳ مورد بررسی قرار گرفته است. همان گونه که مشاهده می‌شود که تغییرات دمایی در سنسور ولتاژ بر پایه کریستال با جهت برش  $X$  و انتشار در راستای  $Y$ ، از مرتبه  $10^{-4}$  و در صورتی که در سنسور ولتاژ بر پایه کریستال برش  $Z$  و انتشار در راستای  $Y$ ، از مرتبه ۱ می‌باشد.



شکل ۳: شکل موج تغییرات دمایی خروجی سنسور در دو دمای صفر و  $100^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد و تفاضل این دو: الف) برش  $X$  و انتشار در راستای  $Y$  (ب) برش  $Z$  و انتشار در راستای  $Y$

در واقع حسگر، با برش  $X$  پایداری دمایی بیشتری دارد، که این تفاوت ناشی از اختلاف بین تغییرات دمایی دو ضریب شکست عادی، غیرعادی و وابستگی دمایی متفاوت ضرایب الکترواپتیکی می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که میزان تغییرات  $T_{rms}$  و  $T_{peak-to-peak}$  در بازه دمایی صفر تا  $100^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد برای برش  $X$  و انتشار در راستای  $Z$  در مقایسه با برش  $Z$  و انتشار  $Y$  بسیار ناچیز و خطی است.  $T_{rms}$  برابر با  $0.52\%$  و  $T_{peak-to-peak}$  برابر با  $3/5$  در بازه دمایی صفر تا  $100^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد می‌باشد. اما  $T_{peak-to-peak}$  و  $T_{rms}$  برش  $Z$  و انتشار در راستای  $Y$ ، به شکل سینوسی در بازه  $0$  تا  $0.7\%$  و  $0$  تا  $1/0$  به ترتیب با دوره تناوب ۲۰ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌نماید.