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 برپایه کریستال لیتیوم نایوبیت در دو راستای برش کریستالی متفاوت

حسام امیری[۱]، سکینه صدیقی بنابی[۱]، محمد اسماعیل زیبائی[۲]، ندا یاوری[۱]

[۱]پژوهشگاه نیرو، گروه ابزار دقیق- شهرک غرب، انتهای دادمان، تهران
[۲]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 سانتی‌گراد مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. حسگر شبیه سازی شده برپایه 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 می‌نماید. بنابراین استفاده از حسگر نوری ولتاژ برپایه 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 LiNbO3 Crystal in Two Different cutting Directions

H. Amiri[1], S. K. Sadighi[1], M. I. Zibaii[2], N. Yavari[1]

[1] Instrumentation Department, Niroo Research Institute, Dadman St, Tehran, Iran
[2] 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 LiNbO3 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 LiNbO3 bulk crystal with optical path parallel to z-axis is less than the y propagated, z-cut LiNbO3 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 LiNbO3 crystal demonstrates temperature stability of ±0.01% from 0°C to 100°C compared with the y propagated, z-cut bulk LiNbO3 crystal.

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

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

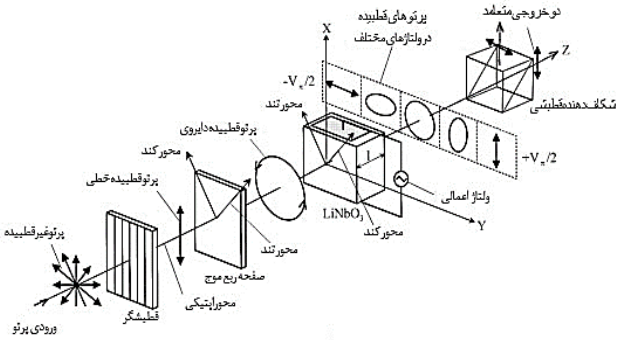
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

۱- مقدمه

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 (Bi4Ge3O12، KD2PO4 و LiNbO3) کوچک است، بنابراین سلول پاکلز به طور نسبی حساسیت کمی دارد که برای آشکارسازی میدان‌های شدید مناسب است. کریستال LiNbO3 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 LiNbO3 با برش z و راستای انتشار درجهت 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 LiNbO3 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 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 LiNbO3 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 قطبش‌گر 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:

$$I = \left| PBS \times M_{Crystal} \times R(-45°) \times WP \times R(45°) \times P \times E \right|^2 \quad (۱)$$

به‌طوری که E، بردار جونز برای نور ورودی، P، ماتریس جونز قطبش‌گر ورودی، $R(\ldots)$، ماتریس دوران، WP، ماتریس جونز صفحه ربع موج، $M_{Crystal}$، ماتریس جونز کریستال LiNbO3 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:

$$\Gamma_{x-cut} = \frac{2\pi l}{\lambda}\left(\frac{V}{d} n_o^3 r_{22}\right) \quad (۲)$$

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

$$\Gamma_{z-cut} = \frac{2\pi l}{\lambda}((n_e - n_o) - \frac{V}{2d}(n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13}) \quad (۳)$$

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 LiNbO3 با دما می‌توان از معادله Sellmeier [۳] طبق رابطه (۴) استفاده کرد.

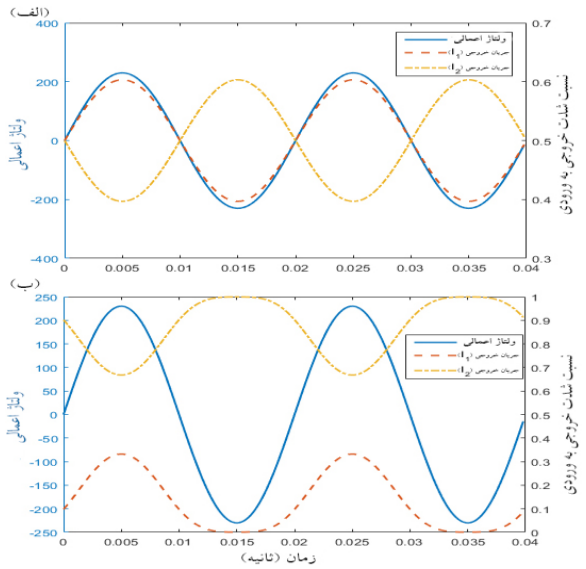
$$n^2 = A_1 + \frac{A_2 + B_1 F}{\lambda^2 - (A_3 + B_2 F)^2} + B_3 F - A_4 \lambda^2 \quad (۴)$$

به طوری که:

$$F = (T - 24.5)(T + 570.5) \quad (۵)$$

مقادیر T، دما بر حسب درجه سانتی‌گراد و λ، طول موج برحسب نانومتر می‌باشد که ضرایب موجود در رابطه (۴) در مرجع [۴] می‌توان یافت. وابستگی دمایی ضریب الکترواپتیکی کریستال $LiNbO_3$ در دو راستای برش z در راستای انتشار y و برش x در راستای انتشار در طول موج ۶۲۳ نانومتر برابر با $r_{33}=4.9\times10^{-4}/°C$، $r_{13}=4.6\times10^{-4}/°C$ و $r_{22}\sim0$ می‌باشد[۳-۴] . وابستگی دمایی تغییرات طولی و عرضی کریستال به ترتیب برابر با $\alpha_a = 15.4\times10^{-6}/°C$ و $\alpha_c = 7.5\times10^{-6}/°C$ می‌باشد[۵]. همچنین دوشکستی خطی صفحه ربع موج کوارتز مرتبه صفر نیز به دما وابسته است و برابر با $\gamma = -1.7\times10^{-4}/°C$ 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 ۳۰۰^{0C} نشان می‌دهد که تغییرات ضریب شکست عادی n_o از مرتبه ۱×۱۰^{-۳} و ضریب شکست غیرعادی n_e از مرتبه ۱۳×۱۰^{-۳} 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 دارد برش x و یا y کریستال با جهت انتشاری z است. شبیه‌سازی سنسور ولتاژ برای ابعاد کریستال ۱۰×۲×۲ میلی‌متر مکعب و ولتاژ اعمالی ۲۲۰ 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 ۲ کیلوولت شکل موج سینوسی باقی می‌ماند. اما مطابق شکل ۲-ب در برش راستای z و انتشار در راستای y خروجی سنسور در ولتاژ ۲۲۰ 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

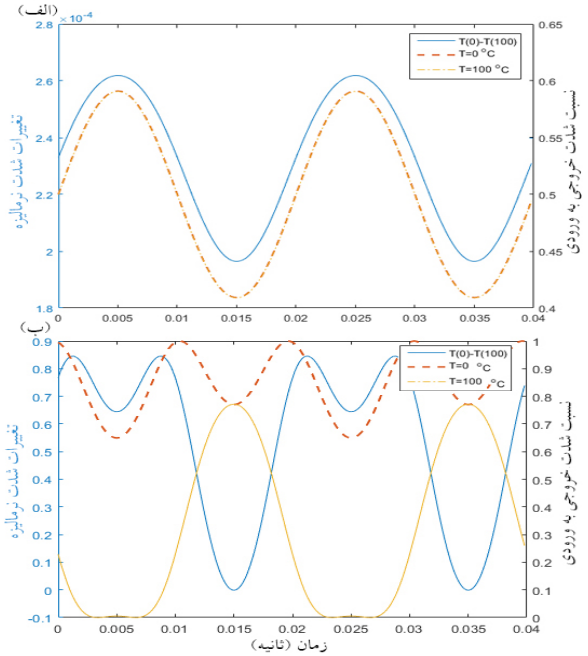
پیش‌بینی وابستگی خروجی سنسور به دما با استفاده از رابطه (۴) تا (۷) برای مقایسه دو دمای صفر و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در شکل ۳ نشان داده شده است. تغییرات دمایی ضرایب شکست، ضرایب الکترواپتیکی، ضریب انبساط طولی و عرضی و تغییرات دوشکستی صفحه ربع موج مرتبه صفر در نظر گرفته شده است.

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 $T_{peak\text{-}to\text{-}peak}$ در بازه دمایی صفر تا ۱۰۰ درجه

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

سانتی‌گراد در شکل ۳ مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود که تغییرات دمایی درسنسور ولتاژ بر پایه کریستال با جهت برش x و انتشار در راستای y، از مرتبه $۱۰^{-۴}$ 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 ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و تفاضل این دو: الف) برش x و انتشار در راستای z 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 می دهد که میزان تغییرات T_{rms} و $T_{peak-to-peak}$ در بازه دمایی صفر تا ۱۰۰ 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 ۰/۵۲ و $T_{peak-to-peak}$ برابر با ۳/۵ در بازه دمایی صفر تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. اما T_{rms} و $T_{peak-to-peak}$ برش z و انتشار در راستای y، به شکل سینوسی در بازه ۰ تا ۰/۷ و ۰ تا ۱/۰ به ترتیب با دوره تناوب ۲۰ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌نماید.

۴- نتیجه‌گیری

حسگر نوری ولتاژ با استفاده از کریستال LiNbO3 در دو راستای برش z و انتشار y و همچنین برش x و انتشار z، در بازه دمایی صفر تا ۱۰۰ 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 درصورتی 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 به‌طوری که تغییرات T_{rms} و $T_{peak-to-peak}$ در بازه دمایی صفر تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بسیار ناچیز، خطی و از مرتبه $۱۰^{-۴}$ 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. درنتیجه سنسور ولتاژ اپتیکی برپایه اثر پاکلز در کریستال LiNbO3 در برش x در راستای انتشار z، در مقایسه با نوع برش z و انتشار y، بسیار پایدارتر بوده و تغییرات دمایی برابر با ۰/۰۱ ٪ خواهد داشت.

مرجع‌ها

[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 LiNbO3," 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.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]