بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

بررسی قابلیت اثر فوتوالاستیک در موجبر نوری $Ti:LiNbO_3$ برای چرخش قطبش

مریم گنجی، رضا اسدی

تهران، لویزان، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی برق والکترونیک

چکیده – موجبر نوری در دیافراگم لیتیوم نیوبایت با ضخامت ۰/۵ میلیمتر با استفاده از روش نفوذ تیتانیوم ساخته شد و قابلیت خاصیت فوتوالاستیک برای تغییر قطبش در نور عبوری از موجبر که در اثر اعمال فشار خارجی رخ می‌دهد، اندازه‌گیری شد. برای افزایش تغییر قطبش، مکان موجبر در نزدیک لبه دیافراگم قرار داده شد و نشان داده شد که با وجود ضخامت نسبتاً زیاد دیافراگم، تغییرات قطبش برای موجبر واقع در نزدیک لبه آن، قابل توجه می‌باشد طوری که می‌توان از آن برای استفاده در فشار سنج با دقت اندازه‌گیری بهتر از ۰/۵ اتمسفر استفاده کرد.

کلید واژه- اثر فوتوالاستیک، لیتیوم نایوبایت، موجبر نوری.

Investigation on the Capability of Photo-elastic Effect in $Ti:LiNbO_3$ Waveguide for Polarization Rotation

Maryam Ganji, Reza Asadi

Department of Electronic and Electrical Engineering, Malek Ashtar University, Lavizan, Tehran

Abstract- An optical waveguide was fabricated in a diaphragm of $LiNbO_3$ with 0.5mm thickness by using Titanium indiffusion method and the capability of the photo-elastic effect for the change of polarization of the transmitted light from the waveguide that is caused by applying external pressure was measured. For increasing of the change of polarization, the location of the waveguide was considered near the edge of the diaphragm and it has been shown that in spite of relatively large thickness of the diaphragm, the change of polarization for the waveguide near the edge of diaphragm is sufficiently great so that it can be used as a pressure sensor with accuracy better than 0.5 atm.

Keywords: Photo-elastic Effect, $LiNbO_3$, Optical Waveguide.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

۱- مقدمه

استفاده از اثر فوتوالاستیک برای اندازه‌گیری فشار با استفاده از موجبرهای نوری بسیار مورد توجه می‌باشد. در این اثر فشار خارجی باعث ایجاد تنش داخلی در ماده و در نتیجه تغییر فواصل اتمی و تغییر ضریب شکست می‌شود. مزیت این نوع حسگرها نسبت به انواع متداول دیگر از جمله حسگرهای مبتنی بر سیستمهای میکرو الکترومکانیک(MEMS)، عدم نیاز آنها به مدارات الکترونیکی در نزدیک حسگر می‌باشد. ضمن اینکه در حسگرهای مبتنی بر سیستمهای میکرو الکترومکانیک، برای پرهیز از مشکلات مربوط به نویز الکتریکی و تاثیر نامطلوب تداخلات الکترومغناطیسی، لازم است مدارات الکترونیکی بصورت مجتمع به همراه حسگر بر روی یک بستر و با استفاده از فن‌آوری مدارات مجتمع الکترونیکی ساخته شوند که این امر باعث پیچیدگی‌های زیاد و افزایش هزینه ساخت می‌شود. این درحالی است که با استفاده از حسگرهای مبتنی بر موجبرهای نوری، ضمن کوچک سازی، امکان انتقال اطلاعات حسگر به مکان مناسب با استفاده از فیبر نوری و بدون استفاده از مدار الکترونیکی فراهم می‌شود. این ویژگی ضمن ساده‌سازی فرایند ساخت، بخصوص در محیطهای با خطر انفجار از جمله در صنایع نفت و گاز، حائز اهمیت است.

برای ساخت حسگر فشار مبتنی بر اثر فوتوالاستیک معمولاً از روش ساخت موجبر بر روی یک لایه نازک قابل انعطاف (دیافراگم) استفاده می‌شود و تغییر ضریب شکست موجبر که باعث تغییر فاز و یا قطبش نور درون موجبر می‌شود، اندازه‌گیری می‌شود. علت استفاده از لایه نازک به شکل دیافراگم، قابلیت آن برای ایجاد تنش زیاد بخصوص در نزدیک لبه‌های دیافراگم در اثر اعمال فشار خارجی است [1]. مشخص است که ابعاد بزرگتر دیافراگم و همینطور کاهش ضخامت لایه دیافراگم باعث ایجاد تنش بیشتر و در نتیجه حساسیت بیشتر حسگر می‌شود. تاکنون برای ساخت این نوع حسگرهای فشار، استفاده از ماده Si بیش از دیگر مواد مورد توجه بوده است [2-3] که علت آن، فرایند ساده‌تر میکروماشین‌کاری و بخصوص سادگی ساخت لایه نازک بصورت دیافراگم قابل انعطاف در آن است که باعث امکان افزایش حساسیت حسگر می‌شود. البته یکی از مشکلات Si، هزینه زیاد ساخت موجبر در آن است. زیرا برای ساخت موجبر در این ماده، به علت اختلاف ضریب شکست زیاد موجبر نسبت به محیط اطراف آن (از مرتبه ۳) و در نتیجه حساسیت زیاد تلفات نور انتشاری در آن به ناصافی لبه‌های موجبر، ضروری است برای دستیابی به صافی مناسب برای لبه موجبر، از روش لیتوگرافی باریکه الکترونی با دقت بهتر از ۱۰۰nm استفاده شود، اما از طرف دیگر ساخت موجبر در ماده لیتیوم نایوبایت ($LiNbO_3$ (LN به علت اختلاف ضریب شکست کم موجبر با محیط اطراف (از مرتبه ۰/۰۱) بسیار ساده‌تر و کم هزینه می‌باشد و نیاز به لیتوگرافی با دقت حدود یک میکرومتر دارد که به راحتی با روشهای لیتوگرافی نوری قابل تامین است.

LN یک ماده دو شکستی است که به علت ضریب الکترواپتیک بالا در مدارات مجتمع نوری بخصوص برای ساخت مدولاتورهای الکترواپتیک بسیار مورد توجه می‌باشد. علت سادگی ساخت موجبر در این ماده نسبت به Si، استفاده از روش نفوذ برای تشکیل خاصیت موجبری است که در آن از نفوذ مواد مختلفی از جمله H و فلزاتی مثل Ti استفاده می‌شود، این امر باعث اختلاف ضریب شکست کم بین موجبر و محیط اطراف موجبر آن می‌شود که در نتیجه وابستگی تلفات انتشار نور در موجبر را به دقت لبه موجبر کاهش می‌دهد. این در حالی است که در Si موجبر باید با روشهای لایه‌نشانی و لایه‌برداری ساخته شود که باعث ایجاد اختلاف ضریب شکست زیاد بین موجبر و اطراف آن می شود.

البته بر خلاف Si، امکان ساخت لایه نازک در LN، بسیار مشکل است، بنابراین تاکنون ساخت فشار سنج مبتنی بر دیافراگم از جنس LN، گزارش نشده است. هر چند در این تحقیق نشان داده خواهد شد که استفاده از ویفرهای استاندارد با ضخامت ۰/۵mmنیز برای ایجاد دیافراگم LN، با دقت اندازه‌گیری فشار بهتر از یک اتمسفر کافی است که با توجه به مزایای مورد اشاره، می‌تواند برای بسیاری از کاربردها بخصوص مخازن گاز مناسب باشد.

در این تحقیق، برای بررسی قابلیت ماده LN با ضخامت ۰/۵mm برای اندازه‌گیری فشار، از خاصیت تغییر قطبش در موجبرهای ساخته شده با روش نفوذ Ti استفاده شده است. در روش نفوذ Ti، هر دو ضریب شکست عادی و غیرعادی افزایش می‌یابند. بنابراین هر دو قطبش عادی و غیر عادی قابل انتشار هستند و آنچنان که در این مقاله نشان داده خواهد شد، اعمال فشار بر روی سطح موجبر، باعث تغییر مناسبی در اختلاف ضریب شکست برای دو قطبش می‌شود طوری که با موجبری با طول کمتر از ۱cm بر روی LN با

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

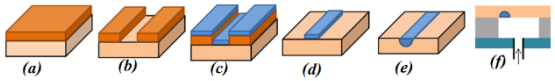
ضخامت ۰/۵mm، بدون نیاز به نازک‌سازی، تغییرات فاز بین دو قطبش با حساسیت $\partial I_D/\partial P=0/014 / atm$ قابل دستیابی است.

۲- روش ساخت

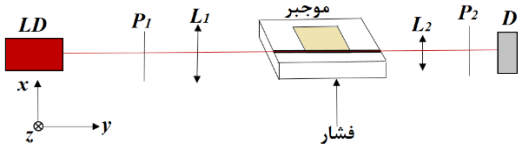
در شکل۱ طرحواره مراحل ساخت موجبر در LN ارائه شده است. در ابتدا نمونه LN با ضخامت ۰/۵mm در ابعاد حدود $1cm^2$ برش داده می‌شود و یک لایه فوتورزیست (shiply1813) با ضخامت حدود یک تا دو میکرومتر با روش لایه نشانی دورانی، بر روی LN لایه نشانی می‌شود. سپس برای خروج حلال موجود در فوتورزیست، نمونه در دمای حدود ۱۰۰°C به مدت ۲ دقیقه پخت داده می‌شود. سپس برای ایجاد طرح موجبر در لایه فوتورزیست، در فرایند فوتولیتوگرافی، سطح فوتورزیست با استفاده از نور ماوراء بنفش و با واسطه یک ماسک اپتیکی تحت تابش قرار می‌گیرد. ماسک مورد استفاده شامل طرح موجبر با عرض حدود ۸ µm و طول ۱cm است. سپس در مرحله ظهور (شکل (1(b) از محلول سود (NaOH) استفاده می‌شود که در نتیجه آن نقاطی از فوتورزیست که تحت تابش قرار گرفته‌اند، در محلول ظهور برداشته می‌شوند. سپس (شکل (c 1)، یک لایه Ti با ضخامت حدود ۹۰nm با روش لایه‌نشانی کند و پاش می‌شود. در این شرایط Ti در نواحی که فوتورزیست برداشته شده است (ناحیه‌ای با عرض ۸ µm) بر روی سطح LN لایه‌نشانی می‌شود و در باقی نقاط، Ti بر روی فوتورزیست قرار می‌گیرد. سپس (شکل (1(b) نمونه به مدت۳ دقیقه در حلال فتورزیست (استون) و در دستگاه اولتراسونیک قرار می‌گیرد تا فوتورزیست و Ti نشانده شده بر روی آن حذف گردد. در نتیجه Ti فقط در قسمت‌هایی که در تماس مستقیم با زیر لایه قرار دارد باقی می‌ماند و بدین ترتیب طرح مورد نظر در لایه Ti بر روی زیر لایه منتقل می‌شود . علت استفاده از این روش که به لیفت-اف موسوم است، دستیابی به کیفیت لبه بهتر در Ti است. سپس برای نفوذ Ti از فرایند عملیات حرارتی در دمای ۱۰۰۰°C به مدت حدود ۱۰ ساعت استفاده می‌شود. در نهایت برای امکان تزویج نور درون موجبر، دو انتهای موجبر صیقل داده می‌شوند. بعد از ساخت موجبر نمونه بر روی حفره مربعی شکل که در شیشه ایجاد شده است، با استفاده از چسب، متصل می‌شود. به این ترتیب سطح روی حفره تشکیل یک دیافراگم را می‌دهد. در شکل ۱(f) برشی از سطح مقطع موجبر در نقطه‌ای از طول موجبر بر روی دیافراگم نشان داده شده است. ابعاد حفره $7\times7\ mm^2$ می‌باشد. سمت دیگر حفره به لوله متصل به مخزن گاز با فشار قابل کنترل وصل می‌شود. همانطور که در شکل ۱(f) مشخص است، نمونه بر روی حفره طوری قرار داده می‌شود که سطح موجبر به سمت پایین حفره قرار گیرد.

اتصال دیافراگم به پایه‌ها باعث ایجاد بیشترین تنش داخلی در لبه آن می‌شود بنابراین مکان موجبر بر روی دیافراگم در حد امکان نزدیک لبه قرار داده شد. با استفاده از میکروسکوپ این فاصله حدود ۰/۲mm اندازه‌گیری شد.

محور تقارن LN (محور اپتیکی) در نمونه ساخته شده موازی با سطح نمونه و عمود بر جهت موجبر می‌باشد. به این ترتیب مدهای TE و TM قطبشگر، معادل با دو قطبش عادی و غیرعادی LN خواهند بود.



شکل ۱- مراحل ساخت موجبر در دیافراگم $LiNbO_3$، (a): لایه‌نشانی و پخت فوتورزیست، (b): لیتوگرافی (شامل تابش و ظهور فوتورزیست)، (c): لایه نشانی Ti، (d): سونش فوتورزیست، (e): عملیات حرارتی برای نفوذ Ti، (f): اتصال نمونه به حفره و اعمال فشار از طریق لوله متصل به مخزن گاز.



شکل ۲- طرح واره روش اندازه گیری. که LD لیزر دیودی، P1 قطبشگر اول، L1 عدسی اول، L2 عدسی دوم، P2 قطبشگر دوم و D آشکار ساز می باشد. قطبشگر دوم زاویه 45^o نسبت به محور x می سازد و در صفحه xz و عمود بر قطبشگر دوم می باشد.

۳- نتایج اندازه‌گیری

با توجه به تفاوت مقدار تغییر ضریب شکست برای دو قطبش TEو TM در اثر اعمال فشار خارجی، انتظار می‌رود که قطبش نور خروجی از موجبر با اعمال فشار تغییر کند. برای مشاهده این اثر از چیدمان مطابق شکل۲ استفاده شد که در آن از دو قطبشگر متعامد در ورودی و خروجی موجبرها استفاده شد. برای ایجاد سهم مساوی برای دو قطبش، قطبشگر اول در ورودی موجبر در راستای ۴۵ درجه نسبت به محور عمود بر سطح LN قرار داده شد و سپس نور لیزر با طول موج ۶۵۰nm توسط عدسی شیئی دورن موجبر تزویج شد. در خروجی موجبر نیز از یک قطبشگر در راستای عمود بر قطبشگر اول استفاده شد و نور خروجی از آن توسط

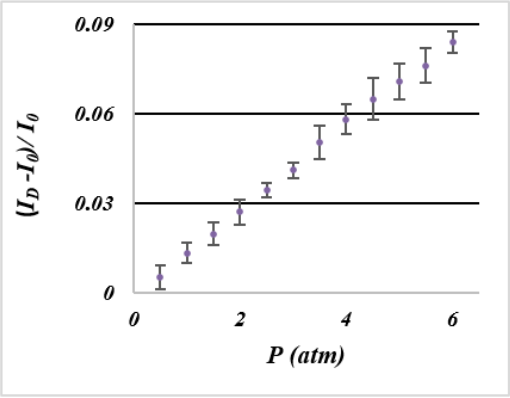
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

آشکارساز اندازه‌گیری شد.

البته لازم به ذکر است با توجه به اینکه ضریب شکست موثر مدهای نوری TE و TM برای دو قطبش در حالت عادی و بدون اعمال فشار، با هم متفاوت است، در فشار صفر نیز قطبش خروجی نسبت به قطبش ورودی تغییر می‌کند بنابراین با وجود تعامد دو قطبشگر ورودی و خروجی نسبت به هم، در فشار صفر نیز شدت خروجی از قطبشگر دوم صفر نیست.

برای اندازه‌گیری حساسیت حسگر، مقدار تغییرات شدت خروجی از قطبشگر دوم (I_D) نسبت به شدت خروجی در حالت فشار صفر (I_0) بر حسب تغییرات فشار اعمالی (P) اندازه‌گیری شد که نتایج آن در شکل ۳ ارائه شده است. با توجه به این شکل، شیب تغییرات شدت که متناسب با حساسیت حسگر می‌باشد $\partial I_D/(I_0\partial P)$=۰/۰۱۴/ atm است.



شکل ۳- تغییرات نسبی شدت خروجی از قطبشگر دوم بر حسب فشار (P) در دیافراگم مربعی با اندازه ۷×۷ mm^2 برای موجبر با فاصله ۰/۲mm نسبت به لبه دیافراگم.

انحراف معیار مشاهده شده در نقاط نمودار شکل ۲، عمدتاً ناشی از دو عامل است که عبارتند از ۱- نوسان شدت لیزر و ۲- تغییرات مقدار تزویج نور در موجبر به علت نوسانات مکانیکی. عامل اول با استفاده از لیزر پایدار و عامل دوم با استفاده از روش تزویج با فیبر و اتصال دائم آن به موجبر قابل رفع است. با توجه به انحراف معیار در شرایط اندازه‌گیری انجام شده (بدون اتصال فیبر)، دقت اندازه‌گیری فشار و تکرار پذیری حسگر حدود ۰/۵ atm است که البته با اعمال اصلاحات مورد اشاره (اتصال دائم فیبر)، انتظار می‌رود این دقت تا ۰/۱atm قابل ارتقاء باشد، که با توجه به سادگی روش ساخت، قابلیت خوبی برای استفاده صنعتی محسوب می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق چرخش قطبش نور در موجبرهای ساخته شده در دیافراگم $LiNbO_3$، در اثر خاصیت فتوالاستیک و اعمال فشار اندازه‌گیری شد و نشان داده شد که بدون نیاز به نازک سازی دیافراگم (که معمولاً برای ساخت این نوع از حسگرها و مبتنی بر ماده Si استفاده می‌شود) و با وجود ضخامت نسبتاً زیاد دیافراگم LN (ضخامت ۰/۵mm)، ساختار مورد استفاده قابلیت استفاده به عنوان حسگر فشار با حساسیت atm / $\partial I_D/\partial P$=۰/۰۱۴ را دارد، به این ترتیب با توجه به مزایای این ماده از لحاظ سادگی ساخت موجبر در آن، روش پیشنهادی قابلیت استفاده بخصوص در صنایع نفت و گاز را دارد. ضمن اینکه برای استفاده صنعتی از این نوع حسگر می‌توان بجای روش تزویج مستقیم نور لیزر به موجبرها که در این تحقیق استفاده شد از روش اتصال فیبر استفاده کرد. علاوه‌براین برای افزایش حساسیت و همینطور رفع نیاز به قطبشگر می‌توان از طرح موجبرهای به شکل تداخل سنج ماخ‌زندر و با قرار دادن یکی از شاخه‌های آن در ناحیه خارج از دیافراگم (به عنوان موجبر مرجع) استفاده کرد.

۵- مراجع

[1] H. Nikkuni, Y. Watanabe, O. Masashi and S. Takashi, *Sensitivity dependences on side length and aspect ratio of a diaphragm in a glass-based guided-wave optical pressure sensor*, Opt. Express, Vol. 16, No. 19, 15024-15032, (2008).

[2] M. Ohkawa and T. Sato, *Scale-reduction rule without drop in the sensitivity of a silicon-based guided-wave optical pressure sensor using a micro-machined diaphragm*, Optical Engineering, Vol. 52, No. 2, 024604, (2012).

[3] N. Saito, Y. Miura, T. Oshima et al., *Experimental study of sensitivity dependences on waveguide position and diaphragm thickness in silicon-based guided-wave optical accelerometer*, Optical Engineering, SPIE, Vol. 51, No. 1, 024604-024604, (2013).

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]