ساخت موجبرهای نوری با روش نفوذ تیتانیوم در لیتیوم نیوبات و بررسی مدهای انتشاری در طول موج ۶۵۰nm

رضا اسدی، محسن اسمعیلی سنگری، علی سابقی و اکبر شریف نیا

مجتمع برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

چکیده – در این تحقیق، موجبرهای نوری مجتمع با عرض کانالهای ۸ میکرومتر در بستر لیتیوم نیوبات ($LiNbO_3$) بوسیله نفوذ تیتانیوم در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد ساخته شده است و تاثیر زمان فرایند نفوذ در بازه ۷ تا ۱۷ ساعت در تلفات اپتیکی کل (ناشی از تزویج توسط فیبر و انتشار درون موجبر) و همینطور توزیع شدت مدهای انتشاری در موجبر برای طول موج نور *nm* ۶۵۰ بررسی شده است.

کلید واژه- اپتیک مجتمع ، لیتیوم نیوبات، موجبر نوری.

Fabrication of optical waveguides by Ti doping inside $LiNbO_3$ and investigation of propagation modes at wavelength of 650nm

Reza Asadi, Mohsen Esmaili Sangari, Ali Sabegi, and Akbar Sharifnia

Department of Electronic and Electrical Engineering, Maleke Ashtar University, Tehran, Iran

Abstract- In this study, integrated optical waveguides with channel width of 8 μm are fabricated by Ti doping inside $LiNbO_3$ at temperature of 1000°C and influence of time duration of the doping process on the total efficiency (arising from coupling by fiber and propagation inside the waveguide) and intensity distribution of the propagation modes in the waveguides are studied for light wavelength of 650nm.

Keywords: Integrated optics, $LiNbO_3$, Optical Waveguide,

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

۱- مقدمه

موجبرهای نوری مجتمع به عنوان یکی از عناصر اصلی مدارات مجتمع نوری، نقش مهمی در گسترش فناوری ارتباطات نوری دارند. یکی از مواد مورد توجه برای ساخت این نوع موجبرها، کریستال لیتیوم نیوبات ($LiNbO_3$) است که به علت خواص الکترواپتیک مناسب، برای ساخت ادوات اپتیکی مثل سوییچ و مدولاتور الکترواپتیک مجتمع [۴-۱] با سرعت بالا (تا ۱۰۰ GHz) [۵] بسیار مورد توجه می‌باشد.

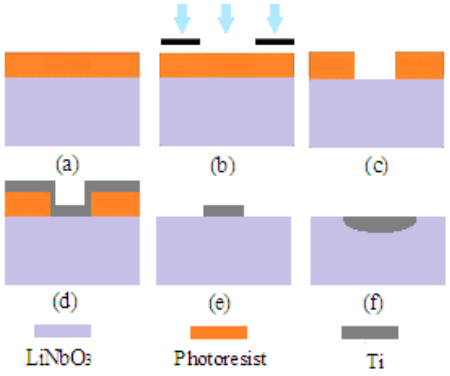
برای ساخت موجبر در $LiNbO_3$ عموماً از روش نفوذ عناصر و مواد مختلفی مثل Ti، Cr و Cu استفاده می‌شود [۶] که از این بین استفاده از فلز Ti [۵-۱] بسیار متداول است. در این روشها اتمهای نفوذ داده شده بصورت جزئی جایگزین اتمهای Li شده و باعث افزایش ضریب شکست و در نتیجه تشکیل موجبر نوری می‌شوند. برای این منظور با استفاده از فرایند لیتوگرافی، ماسکی شامل کانالی با عرض و شکل مورد نظر در لایه واسطی بر روی $LiNbO_3$ ایجاد می‌شود که اجازه نفوذ در نواحی مشخصی را فراهم می‌کند. در این روش با کنترل عرض کانال ماسک و پارامترهای فرایند نفوذ، از جمله مقدار اولیه اتمهای مورد نظر برای نفوذ، دما و زمان فرایند نفوذ، امکان کنترل توزیع نهایی اتمهای نفوذ داده شده و در نتیجه توزیع شکل ضریب شکست موجبر فراهم می‌شود. البته پارامترهای فرایند نفوذ علاوه بر تاثیر بر توزیع ضریب شکست، در دیگر مشخصه‌های موجبر نیز، به واسطه تاثیر در ساختار شبکه‌ای و کیفیت سطح کریستال و همینطور پایداری توزیع اتمهای نفوذ داده شده، تاثیرگذارند، علاوه بر این عدم وجود اطلاعات دقیق از پارامترهای فرایند نفوذ (از جمله ضرایب نفوذ در جهات مختلف شبکه کریستالی) در شرایط دمایی مختلف و غیر خطی و ناهمسانگرد بودن آنها، بخصوص در فرایند نفوذ دو بعدی (برای موجبرهای کانالی)، باعث شده است که علی رغم تحقیقات نسبتاً گسترده در این حوزه، همچنان دستیابی به پارامترهای مناسب فرایند ساخت برای کاربردها و مشخصه‌های مختلف مورد نظر، یکی از چالش‌های عمده این روش باشد. بخصوص اینکه تاکنون عمده این پارامترها برای موجبرهایی با کارکرد در طول موج مخابرات نوری (۱/۳μm-۱/۶μm) مورد بررسی قرار گرفته‌اند که علت آن تلفات کم فیبرهای نوری در این محدوده است، در حالی که در بسیاری از کاربردهای جدید مدارات مجتمع نوری، از جمله حسگرهای نوری مثل حسگرهای مواد شیمیایی و بیولوژیک [۷و۸]، فشارسنجها [۹و۱۰]، حسگرهای میدانهای الکترومغناطیس [۱۱]، نیازی به استفاده از فیبر نوری با طول زیاد وجود ندارد و از این جهت امکان استفاده از طول موجهای مرئی نیز در این کاربردها میسر است. بنابراین برای این نوع کاربردها مناسبتر است که طراحی موجبرها و همینطور فرایندهای ساخت آنها برای کارکرد در طول موجهای پاینتر و از جمله ناحیه مرئی استخراج و بهینه شوند. در این راستا در این تحقیق، برای دستیابی به موجبرهای مناسب در طول موج مرئی (۶۵۰nm)، موجبرهای کانالی در بستر $LiNbO_3$ با روش نفوذ Ti، با عرض کانال ۸μm میکرومتر و در زمانهای نفوذ ۷ تا ۱۷ ساعت در دمای نفوذ ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد ساخته شده و بازدهی آنها در تزویج نور با فیبر نوری و توزیع شدت مدهای انتشاری در موجبرها اندازه گیری شده است.

۲- روش ساخت

برای ساخت موجبر، از کریستالهای $LiNbO_3$ با برش صفحه‌ای در راستای x (x-cut) با ضخامت ۰/۵mm استفاده شد. مراحل اصلی ساخت، در شکل ۱ نشان داده شده است که در آن بعد از برش نمونه ها با طول ۱۲mmو عرض ۱۰mm، ابتدا در مرحله فوتولیتوگرافی، یک لایه فوتورزیست (Shiply 1813) با ضخامت حدود یک میکرومتر با روش لایه نشانی دورانی بر روی نمونه‌ها لایه‌نشانی می‌شود سپس نمونه‌ها در دمای ۱۱۵ درجه سانتی گراد در مدت ۲ دقیقه حرارت داده می‌شوند، سپس سطح فوتورزیست با واسطه‌ی یک ماسک اپتیکی که حاوی طرح موجبر است مورد تابش نور UV قرار می‌گیرد. در انتها با استفاده از یک محلول ظهور، قسمتهایی از فوتورزیست که در معرض تابش قرار گرفته شده است، حل شده و برداشته می‌شود.

برای مرحله لایه نشانی، یک لایه فلز تیتانیوم با ضخامت ۹۰nm با روش لایه نشانی کندوپاش (sputtering) لایه‌نشانی می‌شود. سپس در مرحله لیفت–آف نمونه به مدت۳ دقیقه در حلال فتورزیست (استون) و در دستگاه اولتراسونیک قرار می‌گیرد تا لایه فوتورزیست شسته شده

و در نتیجه قسمتهایی از تیتانیوم که روی فوتورزیست لایه نشانی شده است، برداشته شوند. به این ترتیب لایه تیتانیوم فقط در قسمت‌هایی که در تماس مستقیم با زیر لایه قرار دارد، باقی می‌ماند. سپس برای مرحله نفوذ، نمونه‌ها در کوره در دمای ۱۰۰۰ °C، قرار داده می‌شوند. به علت حساسیت زیاد کریستال $LiNbO_3$ به تنشهای حراراتی، لازم است که افزایش و کاهش دمای کوره با نرخ نسبتاً کمی صورت پذیرد که برای این منظور از تغییرات دمایی ۵۰ درجه سانتی گراد بر دقیقه استفاده شد. نکته حائز اهمیت دیگر در این مرحله که در کیفیت و تلفات موجبر بسیار تاثیر گذار است، استفاده از جریان گاز اکسیژن در کوره به منظور کاهش صدمات سطحی کریستال می‌باشد. این صدمات به علت استفاده از دمای زیاد در کوره و در نتیجه تبخیر جزئی و جداشدن اکسید لیتیوم از سطح کریستال است. مقدار جریان گاز اکسیژن مورد استفاده در این تحقیق ۱ لیتر در دقیقه است. نهایتاً لبه ورودی و خروجی موجبر، برای دستیابی به کیفیت سطح اپتیکی مناسب پولیش داده می‌شوند. در اثر پولیش با کاهش طول نمونه‌ها، طول نهایی موجبرها حدود ۱۰mmبدست می‌آیند.

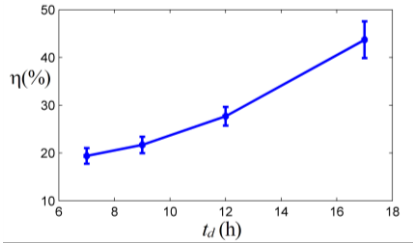


شکل ۲: مراحل ساخت موجبر نوری در $LiNbO_3$

۳- نتایج

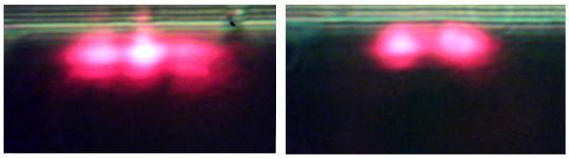
برای اندازه‌گیری بازدهی موجبرها از روش تزویج نور لیزر توسط فیبر نوری استفاده شده است. در این روش نور با یک لیزر با طول موج ۶۵۰ nm توسط یک فیبر نوری با قطر هسته حدود ۹ میکرومتر بطور مستقیم و بوسیله هم خط سازی توسط یک میز ۶ درجه آزادی با دقت تنظیم ۰/۱μm به درون موجبر تزویج می‌شود. نور خروجی موجبر نیز توسط یک عدسی شیئی در سطح آشکار ساز تجمیع و اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری توزیع شدت مدهای خروجی از موجبر نیز از یک CCD که بجای آشکارساز قرار می‌گیرد، استفاده شده است.

در شکل ۲ نتایج اندازه‌گیری بازدهی کل (مجموع تزویج و انتشار) برای موجبرهای ساخته شده در زمان‌های نفوذ مختلف بین ۷ تا ۱۷ ساعت نشان داده شده است. در این شکل نتایج ارائه شده، مربوط به میانگین تعداد ۵ موجبر می‌باشند که در یک فرایند مشابه ساخته شده‌اند. همانطور که مشخص است انحراف معیار در بازدهی موجبرها حدود ۱۰٪ است که این مقدار عمدتاً ناشی از عواملی مثل عدم تکرارپذیری دقیق فرایندهای هم‌خط‌سازی (فیبر و موجبر)، پولیش و لیتوگرافی است.

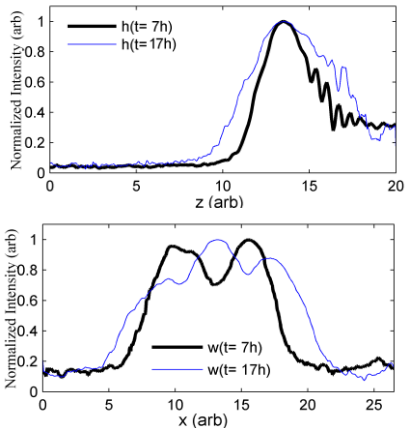


شکل ۲: بازدهی کل (تزویج و انتشار) موجبرها بر حسب زمان نفوذ

همانطور که از شکل ۲ مشخص است، با افزایش زمان نفوذ از ۷ ساعت تا ۱۷ ساعت، بازدهی کل از مقدار حدود ۱۹٪ تا بیش از ۴۳٪ افزایش می‌یابد و یا به عبارتی تلفات کل برای این موجبرها از ۸۱٪ تا کمتر از ۵۷٪ کاهش می‌یابد. این مقدار تلفات ناشی از عوامل متعددی است که از جمله آنها تلفات بازتاب از سطوح ورودی و خروجی موجبر، پراکندگی نور در این سطوح (به علت معایب سطح در فرایند پولیش)، عدم تطبیق کامل اندازه مدهای انتشاری درون فیبر و موجبر و همینطور تلفات مربوط به انتشار نور در طول موجبر است. از این بین تلفات مربوط به بازتاب نور در سطوح ورودی و خروجی موجبر از مجموع تلفات کل به سادگی قابل تفکیک است که مقدار آن با احتساب ضریب شکست ۲/۲، برای LiNbO3 حدود ۱۴٪ برای هر یک از سطوح ورودی و خروجی می‌باشد. علاوه بر این حدود ۴٪ بازتاب از سطح خروجی فیبر رخ می‌دهد، بنابراین مجموع تلفات ناشی از بازتاب‌ها (با در نظر گرفتن جمع لگاریتمی آنها) حدود ۳۰٪ است. این مقدار بازتاب با استفاده از لایه‌های ضد بازتاب و یا استفاده از یک محیط واسط مایع با ضریب شکست مناسب، تا حدود زیادی قابل کاهش است.



شکل ۳: تصویر توزیع شدت خروجی موجبر برای شرایط نفوذ ۷ ساعت (راست) و ۱۷ ساعت (چپ)



شکل ۴: توزیع شدت خروجی موجبر برای شرایط نفوذ ۷ و ۱۷ساعت در راستای عمق (بالا) و عرض (پایین)

در شکل ۳، توزیع شدت نور خروجی موجبر برای دو حالت ۷ و ۱۷ ساعت، نشان داده شده است. در این شکل طرح تناوبی در بالای توزیع شدت خروجی از موجبر ها، مربوط به طرح پراش از لبه خروجی موجبر ناشی از نور لامپ است (که برای تشخیص نقطه مناسب کانون عدسی شیئی، مورد استفاده قرار می‌گیرد). همینطور در شکل ۴ نیز توزیع شدت بهنجار شده در دو راستای عرض و عمق موجبر (شامل مرکز نور خروجی) رسم شده است. همانطور که از شکلهای ۳ و ۴ مشخص است. برای هر دو حالت زمان نفوذ ۷ و ۱۷ ساعت، تعداد مدها در راستای عرض بیش از یک مد است که با افزایش زمان نفوذ نیز، تعداد آنها افزایش می‌یابد، در حالی که در راستای عمق، مد غالب انتشاری در موجبر، عمدتاً یک مد (مد اصلی) می‌باشد. لازم به توضیح است که این امر به معنی تک مد بودن موجبر در راستای عمق نیست بلکه نشان دهنده این است که در صورت هم خط سازی دقیق فیبر و موجبر، سهم مدهای بالاتر در نور منتشر شده، بسیار کم می باشد. بنابراین به منظور دستیابی به موجبرهایی با انتشار غالب تک مد در طول موج ۶۵۰nm، استفاده از زمان نفوذ حداقل تا ۱۷ساعت، همچنان به علت عدم تحریک مدهای بالاتر در راستای عمق مناسب است، اما عرض کانال اولیه ۸ میکرمتر برای هر دو زمان نفوذ ۷ و ۱۷ ساعت، برای دستیابی به انتشار تک مد، بیشتر از حد مطلوب است. بنابراین برای دستیابی به شرایط انتشار تک مد، باید عرض موجبر کاهش یابد که برای این منظور دو روش کاهش عرض کانال اولیه و کاهش زمان نفوذ (به کمتر از ۷ ساعت) قابل استفاده است، البته کاهش زمان نفوذ ضمن کاهش بازدهی، باعث کاهش عمق نفوذ و درنتیجه کاهش تقارن مد انتشاری در راستای عمق و عرض خواهد شد، بنابراین گزینه مناسب برای دستیابی همزمان به بازدهی بالا و انتشار تک مد، استفاده از موجبرهایی با عرض کانال کمتر از ۸μm و زمان نفوذ حداقل ۱۷ ساعت می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

با استفاده از نتایج بدست آمده، مشخص می‌شود که برای نفوذ Ti در $LiNbO_3$، زمان نفوذ ۷ تا ۱۷ ساعت در دمای ۱۰۰۰ °C، برای دستیابی به موجبرهایی با انتشار تک مد در راستای عمق، برای طول موج ۶۵۰nm مناسب است و برای دستیابی به شرایط انتشار تک مد در راستای عرض نیز باید عرض کانال موجبر به کمتر از ۸μm کاهش یابد.

مراجع

[1] J. Chiles, and S. Fathpour, Optica, Vol. 1, pp. 350-355, 2014.

[2] D. Janner, D. Tulli, M. Belmonte and V. Pruneri, J. Opt. A. Pure Appl. Opt. Vol. 10, 104003, 2008.

[3] F. Lucchi1, D. Janner, M. Belmonte, S. Balsamo, M. Villa, S. Giurgola, P. Vergani, V. Pruneri, Opt. Exp., Vol. 15, 10739, 2007.

[4] E. L. Wooten, K. M. Kissa, A. Y. Yan, E. J. Murphy. D. A. Lafaw, P. F. Hallemeier, D. M. Maack, D. V. Attanasio, D. J. Fritz, G. J. McBrien, and D. E. Bossi, IEEE, J. Selected Topics in Quantum Electron., Vol. 6, pp. 69-82, 2000.

[5] K. Noguchi, H. Miyazawa, and O. Mitomi, J. Lightwave Technol. Vol. 16, pp. 615-619, 1998.

[6] Y. Kong, S. Liu, J. Xu, Materials, Vol. 5, pp. 1954-1971, 2012.

[7] A. Zaltron, G. Bettella, G. Pozza, R. Zamboni, M. Ciampolillo, N. Argiolas, C. Sada, S. Kroesen, M. Esseling, and C. Denz, Proc. of SPIE, Optical Sensors, Vol. 9506, 950608, 2015.

[8] D. Yuan, Y. Dong, Y. Liu, and T. Li, Sensors, Vol. 15, pp. 21500-21517, 2015.

[9] R. Ambrosio, G. Lara, A. Jimenez, J. Mireles, J. Ibarra, and A. Heredia, Proc. of SISPAD, pp. 324-327, 2012.

[10] M. Ohkawa, K. Hasebe, S. Sekine, and T. Sato, Appl. Opt., Vol. 41, pp. 5016-5021, 2002.

[11] R. Zeng, B. Wang, B. Niu, and Z. Yu, Sensors , Vol. 12, pp. 11406-114037, 2012.