

تحلیل تأثیر نقص در لبه موج بر تپه‌ای ساخته شده در لیتیوم نایوبایت

هادی دهقان نیری^۱، رضا اسدی^۱ و محمد ملک محمد^۲

۱. دانشکده و برق الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

۲. گروه علوم، دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۸؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۵/۳۰)

چکیده

در این تحقیق، قابلیت روش جدید ساخت موج‌برهای تپه‌ای در لیتیوم نایوبایت مبتنی بر سونش فیزیکی با گاز آرگون و نفوذ تیتانیوم بررسی می‌شود. برای این منظور سهم مد انتشاری در قسمت برآمده موج‌بر تپه‌ای، اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده است. همین طور اثرات نقص‌های دیواره‌های موج‌بر تپه‌ای که یکی از چالش‌های این نوع موج‌برها است، در مقدار تلفات نور منتشر شده در موج‌بر، شبیه‌سازی شده است. ارتفاع قسمت برآمده موج‌بر ساخته شده ۲٫۵ میکرومتر است و نقص‌های موجود در دیواره‌های کناری قسمت برآمده موج‌بر که به دلیل فرایند لیتوگرافی و به خصوص پوشش نوری به وجود می‌آیند، به طور متوسط حدود ۲۰۰ نانومتر اندازه‌گیری شده است. در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی مقدار نفوذ تیتانیوم و توزیع ضریب شکست در موج‌بر، نشان داده شده است که با وجود نقص‌های دیواره‌های کناری موج‌بر، با توجه به کارگیری عمق مناسبی برای نفوذ تیتانیوم، ضمن دستیابی به سهم مد انتشاری حدود ۵۰٪ در قسمت برآمده، تلفات انتشاری کمتر از ۳ dB/cm قابل دستیابی است.

واژه‌های کلیدی: لیتیوم نایوبایت، موج‌بر تپه‌ای، نقص، نفوذ تیتانیوم

۱. مقدمه

از جمله تبادل پروتون و نفوذ فلزاتی مثل تیتانیوم، کروم و مس استفاده شده است [۳]، که از این بین روش نفوذ تیتانیوم بیش از دیگر روش‌ها مورد توجه بوده است. با این حال با وجود سابقه نسبتاً زیاد و توسعه مطلوب روش نفوذ تیتانیوم، روش‌های ساخت و مشخصات این نوع موج‌برها، از جمله اندازه موج‌بر و مدهای انتشاری در آنها، عموماً برای کاربرد در مخابرات نوری و طول موج‌های مربوطه (در محدوده ۱۵۵۰ nm و ۱۳۰۰ nm) بررسی و توسعه یافته‌اند. از این

لیتیوم نایوبایت^۱ به علت ضریب الکترواپتیکی بالا یکی از مواد مهم در اپتیک مجتمع و مدارات مجتمع نوری به خصوص برای ساخت مدوله‌کننده و سوئیچ‌های نوری می‌باشد [۱ و ۲]. تا کنون برای ساخت موج‌بر نوری در لیتیوم نایوبایت به عنوان یکی از عناصر اصلی مدارات مجتمع نوری، روش‌های مختلفی

۱. Lithium niobate (LiNbO_3)

جهت در این حوزه، همچنان برخی چالش‌ها از جمله بهینه‌سازی شرایط ساخت، برای کاربردهایی مثل حسگرهای نوری در طول موج‌های مرئی [۴ و ۵] و همین‌طور افزایش قابلیت مجتمع‌سازی، افزایش بسامد مدولاسیون و کاهش ولتاژ مدولاسیون مطرح می‌باشد. یکی از راه‌حل‌های مطرح برای رفع هم‌زمان سه چالش مورد اشاره، استفاده از موج‌برهای برآمده^۱ و یا به عبارتی تپه‌ای است. در این نوع موج‌برها که با استفاده از روش‌های ترکیبی سونش^۲ و نفوذ ایجاد می‌شوند، اختلاف ضریب شکست موج‌بر نسبت به محیط زیرین، مشابه موج‌برهای معمولی، با استفاده از فرایند نفوذ به دست می‌آید، در حالی که برخلاف موج‌برهای معمولی، اختلاف ضریب شکست در کناره‌های موج‌بر، به وسیله تغییر ماده با استفاده از فرایند سونش ایجاد می‌شود [۶]. استفاده از این نوع موج‌برهای تپه‌ای، ضمن این‌که باعث افزایش قابلیت خم‌پذیری در موج‌برها و در نتیجه کوچک‌سازی بیشتر می‌شود، امکان افزایش بسامد مدولاسیون تا حدود ۱۰۰ GHz را هم فراهم کرده است [۱].

یکی از عوامل محدودکننده بسامد مدولاسیون در موج‌برهای نوری معمولی، که استفاده از موج‌بر تپه‌ای در کاهش آنها مؤثر است، مشکل ناشی از عدم تطبیق سرعت انتشار موج میدان الکتریکی، اعمالی توسط الکترودهای لایه‌نشانی شده در کنار موج‌بر، و سرعت نور انتشاری درون موج‌بر است، این عامل در بسامدهای بیش از بسامد مشخصی که بستگی به اندازه موج‌بر و مشخصات الکترودها دارند، باعث معکوس شدن اثر اعمال میدان در مقدار تغییر فاز نور در طول مسیر انتشار می‌شود. برای افزایش بسامد مشخصه مدوله‌کننده، یکی از راه‌حل‌ها، کاهش طول موج‌بر است که البته این امر باعث افزایش ولتاژ مورد نیاز مدولاسیون می‌شود. در این شرایط، استفاده از موج‌بر تپه‌ای امکان هم‌پوشانی مؤثرتر میدان الکتریکی با مد انتشاری درون قسمت برآمده را فراهم می‌کند. علاوه بر این با استفاده از موج‌بر تپه‌ای، به علت اختلاف ضریب شکست زیاد

ناشی از تغییر ماده، امکان دستیابی به موج‌بر و مد انتشاری کوچک‌تر و در نتیجه کاهش فاصله الکترودها در دو طرف موج‌بر فراهم می‌شود. این عوامل باعث کاهش ولتاژ مدولاسیون مورد نیاز و یا به طور معادل، کاهش طول موج‌بر برای ولتاژ ثابت و در نتیجه افزایش بسامد مشخصه می‌شوند.

با توجه به مزایای مورد اشاره برای موج‌بر تپه‌ای، ساخت این نوع موج‌برها در لیتیوم نایوبایت، یکی از موضوعات مورد توجه در حوزه مدارات مجتمع نوری می‌باشد و تاکنون روش‌های مختلفی برای این منظور ارائه شده است که از جمله آنها استفاده از سونش خشک شیمیایی^۳ لیتیوم نایوبایت با استفاده از گازهای مختلفی از جمله SF_6 ، CHF_3 ، CF_4 و NF_3 می‌باشد [۷-۱۲]. به علاوه روش‌های ترکیبی مثل سونش شیمیایی خیس^۴ لیتیوم نایوبایت به همراه فرایند تبادل پروتون نیز استفاده شده است [۱۳]. سونش خیس عموماً با استفاده از اسید فلئوریک، به همراه یک محلول دیگر مانند اسید نیتریک، اتانول یا آب اکسیژنه انجام می‌شود.

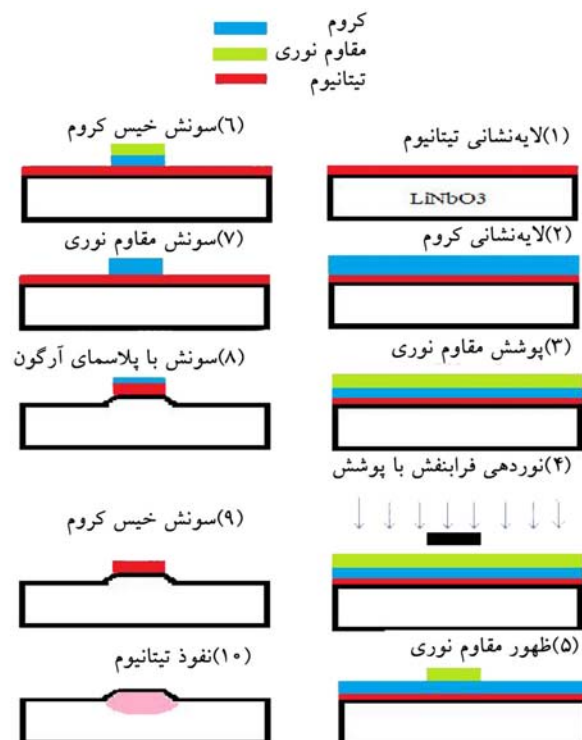
بر خلاف سونش شیمیایی خیس، روش‌های سونش شیمیایی خشک قابلیت بالایی برای سونش ناهمسانگرد و کنترل پذیری فرایند سونش دارند اما در هر دو دسته روش‌های مورد اشاره، یکی از مشکلات سونش شیمیایی، استفاده از مواد خطرناک ترکیبات گاز فلئور و یا اسید فلئوریک است. به علاوه در روش‌های سونش شیمیایی خشک، به علت استفاده از ترکیبات فلئور، لایه فلئورید لیتیوم (LiF) بر روی سطح در حال سونش، بازنشانی می‌شود که از ادامه سونش جلوگیری می‌کند [۱۴]. علاوه بر این، این لایه باعث تخریب سطح و در نتیجه کاهش ضریب الکترواپتیک لیتیوم نایوبایت می‌شود. یکی از روش‌های مقابله با این مشکل، کم کردن تمرکز اتم‌های لیتیوم در سطح نمونه و جایگزینی آن با پروتون، به وسیله اضافه کردن یک مرحله در فرایند ساخت، با استفاده از فرایند تبادل پروتون به وسیله نفوذ هیدروژن در اسید در دمای بالا است. به این ترتیب میزان بازنشانی ترکیب فلئورید لیتیوم کم شده و

۳. Dry chemical etching

۴. Wet chemical etching

۱. Ridge

۲. Etching



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) روند ساخت موج‌بر تپه‌ای با روش سونش با پلاسمای آرگون و نفوذ تیتانیوم.

روش پیشنهادی در این تحقیق، مقدار تلفات ناشی از نقص‌ها، با استفاده از شبیه‌سازی، محاسبه می‌شود. علاوه بر این، سهم مد نور انتشاری درون قسمت برآمده در موج‌بر که از شاخص‌های مهم موج‌برهای تپه‌ای است، با استفاده از اندازه‌گیری و همین‌طور شبیه‌سازی، بررسی شده است.

۲. روند ساخت موج‌بر تپه‌ای به روش سونش با

پلاسمای آرگون

برای ساخت موج‌بر تپه‌ای، از لایه لیتیوم نایوبایت تک‌بلور متجانس^۱ با برش صفحه‌ای در جهت x با ضخامت 0.5 میلی‌متر استفاده شد. مراحل ساخت همان‌طور که به‌طور خلاصه در شکل ۱ نشان داده شده است، به این ترتیب است که بعد از برش لایه در ابعاد مورد نظر و شستشوی آن، به ترتیب یک لایه تیتانیوم و یک لایه کروم با ضخامت‌های 100 نانومتر و یک

نرخ سونش افزایش می‌یابد [۱۵]، هر چند این روش باعث افزایش پیچیدگی و خطرات فرایند ساخت می‌شود.

برای رفع چالش‌های مطرح شده در روش‌های سونش شیمیایی لیتیوم نایوبایت برای ساخت موج‌بر تپه‌ای، در این تحقیق روش جدیدی مبتنی بر سونش خشک فیزیکی با استفاده از پلاسمای آرگون ارائه شده است. در این روش، به علت استفاده از گاز آرگون که یک گاز خنثی می‌باشد، ضمن کاهش خطرات ساخت، هیچ‌گونه ترکیب شیمیایی با مواد تشکیل دهنده لیتیوم نایوبایت ایجاد نمی‌شود و بنابراین نرخ سونش در طول انجام عملیات سونش (بدون تغییر سایر ضریب‌های عملیات) تقریباً ثابت باقی می‌ماند. البته همان‌طور که نشان داده خواهد شد، در این روش ناصافی ناشی از پوشش اپتیکی مورد استفاده در لیتوگرافی در مرحله سونش نیز باقی می‌ماند که بسته به دقت پوشش می‌تواند تا بیش از صد نانومتر باشد. وجود این نقص‌ها می‌تواند باعث پراکنده شدن نور و در نتیجه افزایش تلفات انتشار نور در موج‌بر شود. بنابراین برای بررسی قابلیت

۱. Congruent

میکرومتر، با استفاده از دستگاه کندوپاش^۱ لایه‌نشانی می‌شود. علت استفاده از لایه کروم، به کارگیری آن به عنوان لایه پوشش در مرحله سونش لیتیوم نایوبایت با گاز آرگون است.

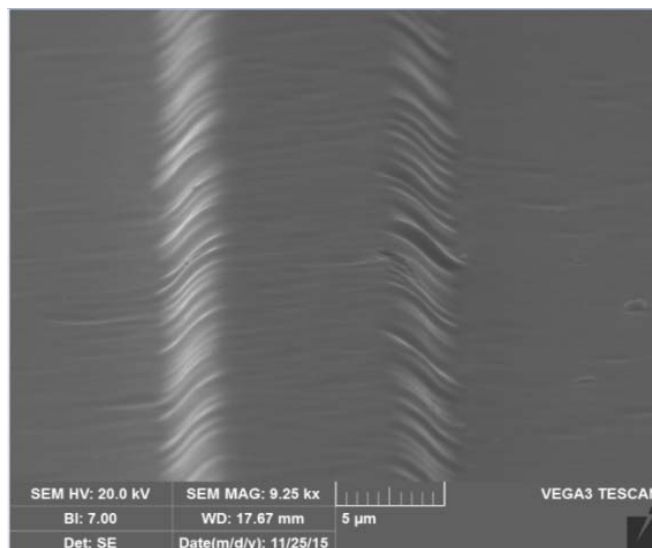
در مرحله بعد، به منظور ایجاد طرح موج‌بر بر روی لایه کروم، از روش لیتوگرافی نوری متعارف استفاده می‌شود. برای این منظور با استفاده از روش لایه‌نشانی دورانی، یک لایه مقاوم نوری با ضخامت حدود یک میکرومتر لایه‌نشانی می‌شود و با استفاده از تابش نور فرابنفش با واسطه پوشش اپتیکی، شامل طرح موج‌بر، به همراه فرایند ظهور و سپس سونش خیس کروم، طرح موج‌بر به ترتیب به لایه مقاوم نوری و کروم منتقل می‌گردد. سپس با سونش مقاوم نوری، نمونه برای مرحله سونش فیزیکی لیتیوم نایوبایت با گاز آرگون آماده می‌شود.

برای سونش لیتیوم نایوبایت به وسیله گاز آرگون، دستگاه کندوپاش برای شتاب دادن پلاسمای آرگون استفاده شد. محفظه کندوپاش قبل از تزریق گاز آرگون، با یک خلاء مناسب، تا حد $10^{-8} \times 1 \text{ Bar}$ ، تخلیه شد تا آلودگی‌ها و اکسیژن محیط کندوپاش به حداقل مقدار ممکن برسد. بعد از تشکیل پلاسما فشار محفظه در $4 \mu\text{Bar}$ قرار داده شد. این فشار با توجه به آزمایشات انجام شده و با توجه به میزان یکنواختی مورد نیاز برای شارش پلاسمای آرگون برای بمباران نمونه انتخاب شد. پلاسما بین صفحات کاتد و آند شتاب می‌گیرد و به سطح زیرلایه برخورد می‌کند. نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در معرض پلاسمای آرگون قرار داده شد. لازم به ذکر است زمان سونش مناسب برای عمق مورد نظر پله با توجه به نسبت سرعت سونش زیرلایه و لایه پوشش (کروم) به دست می‌آید. در این مرحله هر دو لایه کروم و تیتانیوم و سپس سطح لیتیوم نایوبایت در قسمت خارج از لایه کروم، تحت سونش قرار می‌گیرند، بنابراین برای دستیابی به عمق مورد نظر برای ایجاد پله در لیتیوم نایوبایت و جلوگیری از سونش لایه تیتانیوم در قسمت بالای موج‌بر، زمان سونش باید با توجه به ضخامت لایه کروم و نسبت سرعت سونش کروم و لیتیوم نایوبایت انتخاب شود. برای این منظور با انجام آزمایشات

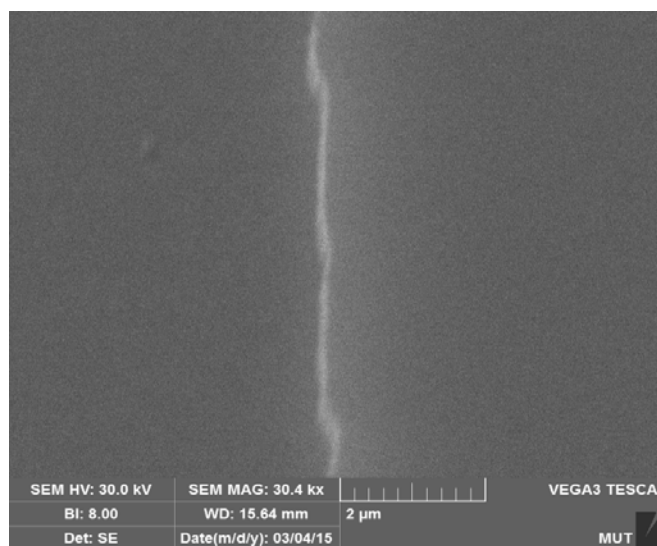
متعدد مشخص شد که سرعت سونش لایه کروم و لیتیوم نایوبایت در فشار $4 \mu\text{Bar}$ ، به ترتیب حدود ۳۰ و ۸۰ نانومتر بر دقیقه است. بنابراین با توجه به ضخامت لایه کروم مورد استفاده (یک میکرومتر)، با استفاده از زمان سونش ۳۰ دقیقه، در این مرحله با توجه به تفاوت سرعت سونش کمتر لایه کروم نسبت به زیرلایه، قبل از سونش کامل لایه کروم، ضخامت مورد سونش در زیرلایه در اطراف لایه کروم (قسمت ۸ در شکل ۱) و یا به عبارتی ارتفاع برآمدگی در زیرلایه حدود ۲٫۵ میکرومتر به دست آمد. ضخامت لایه کروم طوری انتخاب شده است که بعد از ۳۰ دقیقه زمان سونش فیزیکی با گاز آرگون، بخشی از آن (حدود ۱۰۰ نانومتر) برای حفاظت از لایه تیتانیوم در برابر سونش باقی بماند (مطابق مرحله ۸ در شکل ۱). باقی مانده لایه کروم در مرحله بعد و قبل از فرایند نفوذ تیتانیوم با استفاده از سونش شیمیایی خیس برداشته می‌شود. در نهایت برای تشکیل موج‌بر، از روش متداول نفوذ تیتانیوم با استفاده از بازپخت حرارتی در کوره‌ای با دمای حدود ۱۰۵۰ درجه سلسیوس به مدت زمان ۷ ساعت استفاده شد.

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی یک نمونه از موج‌برهای ساخته شده با عرض حدود ۱۰ میکرومتر، در شکل ۲ (الف) نشان داده شده است. در این تصویر برای مشاهده طول بیشتری از موج‌بر، تصویربرداری در راستای طول موج‌بر با زاویه زیاد انجام شده است. از این جهت شاخص طول نشان داده شده در تصویر برای راستای عرض موج‌بر استفاده می‌شود و برای راستای طول موج‌بر تصویر حدود ۱۰ برابر فشرده شده است.

همان طور که در این تصویر دیده می‌شود اعوجاجی در دیواره‌های کناری موج‌بر وجود دارد. این اعوجاج که دارای فرورفتگی‌هایی با اندازه متوسط حدود ۲۰۰ nm و با چگالی حدود یک نقص در هر ۱٫۵ میکرومتر است، ناشی از اعوجاج در لبه پوشش مورد استفاده در مرحله لیتوگرافی نوری (مرحله شماره ۴ در شکل ۱) است که در مرحله سونش با گاز آرگون، به دیواره کناری موج‌بر ایجاد شده در لیتیوم نایوبایت، انتقال می‌یابد.



(الف)

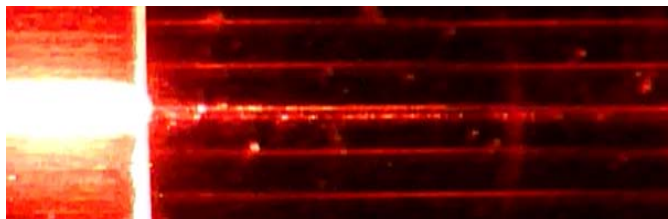


(ب)

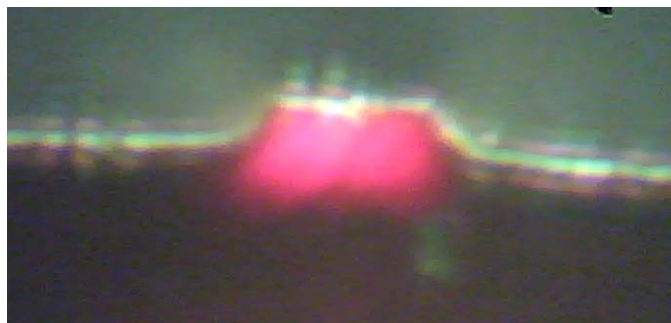
شکل ۲. (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌ای از موج‌برهای تپه‌ای ساخته شده با روش سونش با گاز آرگون. از آنجا که تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی به صورت مایل گرفته شده است تصویر در راستای عمود حدود ۱۰ برابر فشرده شده است. (ب) تصویر از بالا از لبه طرح در لایه کروم بعد از فرایند لیتوگرافی نوری (قبل از سونش با گاز آرگون).

نوری برای انتقال طرح به لایه کروم، اعوجاج در لبه طرح در لایه کروم حدود ۲۰۰ nm به دست می‌آید، که همین مقدار نیز بعد از فرایند سونش با گاز آرگون به زیرلایه لیتیوم نیوبایت منتقل شده است. این مقدار اعوجاج توسط تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوطه به لبه طرح در لایه کروم بعد از مرحله لیتوگرافی نوری در شکل ۲ (ب) نشان داده شده است.

لازم به ذکر است که برای تهیه پوشش مربوط به طرح موج‌بر بر روی لایه کروم با صافی لبه بهتر از ۱۰۰ نانومتر احتیاج به دستگاه‌های لیتوگرافی دقیق مثل لیتوگرافی باریکه الکترونی است و با استفاده از روش‌های متداول لیتوگرافی نوری امکان تهیه پوشش با دقت از مرتبه ۱۰۰ نانومتر وجود ندارد. در این تحقیق نیز با توجه به استفاده از پوشش اپتیکی و سپس فرایند لیتوگرافی



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تصویر از بالای موج بر تپه‌ای در شرایط تزویج نور با طول موج ۶۵۰ نانومتر توسط تار نوری.



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تصویر نور خروجی موج بر تپه‌ای ساخته شده در شرایط تزویج نور با طول موج ۶۵۰ نانومتر.

و توزیع ضریب شکست به دست آمده شبیه‌سازی و محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از توزیع ضریب شکست محاسبه شده، نحوه انتشار نور درون موج‌بر (بدون نقص) به وسیله نرم‌افزار Optiwave شبیه‌سازی می‌شود و در نهایت با اضافه کردن نقص‌ها در لبه موج‌بر، مقدار تلفات ناشی از نقص‌ها محاسبه می‌شود.

برای محاسبه مقدار نفوذ تیتانیوم، از مدل نفوذ استفاده شده است. در این مدل چگونگی توزیع یک باریکه تیتانیوم با عرض w با استفاده از رابطه (۱) به دست می‌آید [۱۶-۱۸]

$$c(x, y) = c_0 \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{w}{2D_H} \left(1 + \frac{2x}{w} \right) \right] + \operatorname{erf} \left[\frac{w}{2D_H} \left(1 - \frac{2x}{w} \right) \right] \right\} \exp \left(-\frac{y^2}{D_V^2} \right). \quad (1)$$

رابطه (۱) چگونگی نفوذ تیتانیوم در یک زیرلایه لیتیوم نایوبایت تخت (بدون برآمدگی) به دست می‌دهد. در رابطه (۱)، تابع erf معرف تابع خطا است. x فاصله از مرکز موج‌بر در راستای افقی و y فاصله از موج‌بر در راستای عمودی (عمق موج‌بر) است. c_0 ثابت اولیه تمرکز تیتانیوم است که از رابطه (۲) به دست می‌آید

۳. اندازه‌گیری مد انتشاری درون موج‌بر تپه‌ای

برای مشخصه‌یابی موج‌بر ساخته شده، از لیزر ۶۵۰ نانومتر تزویج شده به تار نوری و یک میز ۶ درجه آزادی (برای هم‌خط‌سازی و تزویج نور درون تار به موج‌بر) استفاده شد. در شکل ۳ تصویر تزویج نور و انتشار آن درون موج‌بر نشان داده شده است. برای جمع‌آوری و متمرکز کردن نور خروجی از موج‌بر و مشاهده تصویر مد نور خروجی، یک عدسی شیئی $40\times$ با روزنه عددی ۰٫۶، مورد استفاده قرار گرفت. از یک میکروسکوپ دیجیتال نیز برای تصویربرداری و بزرگ‌نمایی بیشتر استفاده شد. تصویر مد نور خروجی از موج‌بر ساخته شده در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است مد نور منتشر شده در موج‌بر عمدتاً به صورت تک‌مد می‌باشد و سهم زیادی از آن نیز درون قسمت برآمده موج‌بر قرار دارد.

۴. شبیه‌سازی موج‌بر تپه‌ای با استفاده از روش

انتشار پرتو

برای شبیه‌سازی موج‌بر تپه‌ای، ابتدا فرایند و مقدار نفوذ تیتانیوم

شده است. بنابراین بعد از محاسبه مقدار نفوذ $c(x,y)$ با استفاده از رابطه (۱)، با اعمال ضریب محاسبه شده در رابطه (۵)، مقدار نفوذ به صورت رابطه (۶) اصلاح می‌شود

$$c_1(x,y) = (1+c(x,y)). \quad (6)$$

با محاسبه انتگرال رابطه (۵)، برای شرایطی منطبق با شرایط مورد استفاده در فرایند ساخت (اشاره شده در بخش ساخت) و نتایج حاصله از شکل موج بر تپه‌ای (شکل ۴) میزان $\alpha \approx 0.13$ به دست می‌آید. مقدار کم ضریب α قابل قبول بودن مدل مورد استفاده به صورت تقریب مرتبه اول برای محاسبه توزیع نفوذ در موج بر تپه‌ای را تأیید می‌کند. با استفاده از توزیع تیتانیوم، توزیع ضریب شکست عادی (o) و غیر عادی (e) از رابطه (۷) به دست می‌آید [۲۴ و ۲۵]

$$dn = d_i [F_i c(x,y)]^{\gamma_i}, \quad i = o, e \quad (7)$$

در رابطه (۷)، d ضریب پاشندگی^۱، F ثابت توزیع و γ توان توزیع می‌باشد. ضریب پاشندگی با در نظر گرفتن طول موج 650 nm از روابط (۸) و (۹) به دست می‌آید [۲۴].

$$d_o(\lambda) = \frac{0.67\lambda^2}{\lambda^2 - 0.13} \times 0.97, \quad \lambda (\mu m) \quad (8)$$

$$d_e(\lambda) = \frac{0.839\lambda^2}{\lambda^2 - 0.645} \times 0.99, \quad \lambda (\mu m) \quad (9)$$

مقدار F برای ضریب شکست عادی برابر 1.3×10^{-25} و برای ضریب شکست غیر عادی برابر 1.3×10^{-25} و توان توزیع (۷) برای ضریب شکست عادی برابر 0.55 و برای ضریب شکست غیر عادی برابر 1 در نظر گرفته می‌شود [۲۴].

با توجه به دما و زمان نفوذ مورد استفاده در این تحقیق (1050°C درجه سلسیوس و 7 ساعت) توزیع اختلاف ضریب شکست برای قطبش عادی برای موج بر 10° میکرومتری در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل، شکل‌های سمت چپ، توزیع اختلاف ضریب شکست عادی محاسبه شده از رابطه (۷) بدون حذف ناحیه کناریه که در واقع توزیع ضریب شکست برای موج بر کانالی معمولی و بدون برآمدگی است، را نشان می‌دهند و شکل‌های سمت راست توزیع اختلاف ضریب

$$c_o = \frac{\tau C_m}{\sqrt{\pi D_V}}. \quad (2)$$

در رابطه (۲)، τ ضخامت اولیه تیتانیوم و $C_m = \left(\frac{\rho}{M_{at}} \right) N_A$ ثابت ماده نفوذکننده است که در آن ρ چگالی ماده و M_{at} وزن اتمی آن و N_A عدد آووگادرو است. برای تیتانیوم برابر 5.67×10^{22} به دست می‌آید.

D_H و D_V به ترتیب طول نفوذ افقی و عمودی تیتانیوم درون لیتیوم نایوبایت هستند که با استفاده از روابط (۳) و (۴) به دست می‌آیند

$$D_H = \tau \sqrt{t D_H} \exp(-T_o / T), \quad (3)$$

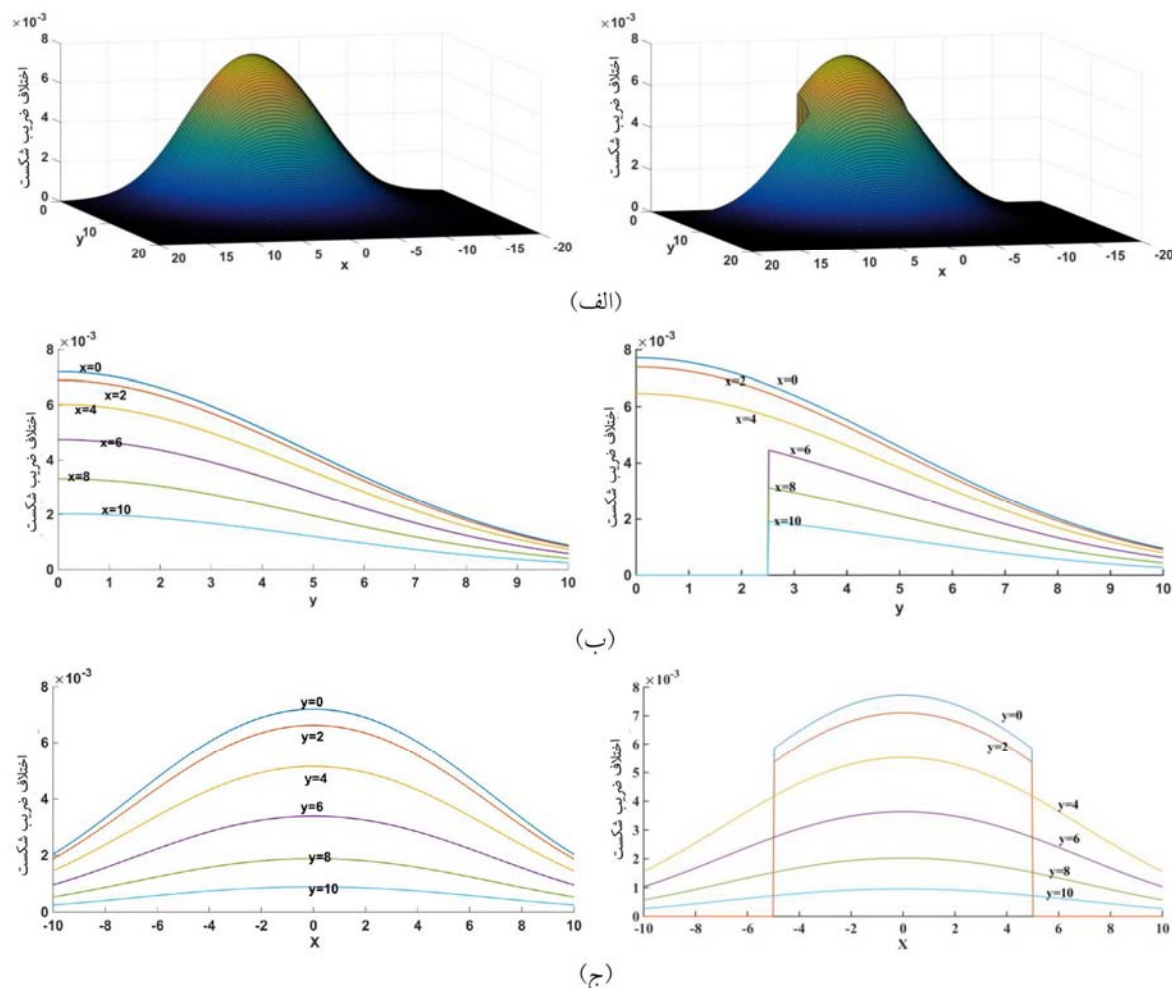
$$D_V = \tau \sqrt{t D_V} \exp(-T_o / T). \quad (4)$$

در روابط (۳) و (۴)، t زمان نفوذ، T_o ضریب دما و T دما بر حسب کلین می‌باشد. در این شبیه‌سازی، ضریب دما برابر عدد 3030°C کلین در نظر گرفته شده است [۱۹]. $D_{H,V}$ و $D_{H,V}$ ثابت انتشار افقی و عمودی می‌باشد و در این شبیه‌سازی هر دو برابر $0.23 \text{ cm}^2/\text{s}$ در نظر گرفته شده است [۲۰-۲۳].

لازم به توضیح است که رابطه (۱) برای شرایط نفوذ در سطح تخت، دقیق است و ما در این تحقیق آن را به صورت تقریب برای موج بر تپه‌ای استفاده می‌کنیم. این تقریب با توجه به حذف ناحیه کناره‌های موج بر باعث برآورد کمتر در مقدار چگالی نفوذ تیتانیوم نسبت به حالت واقعی خواهد شد. مقدار این اختلاف را می‌توان در تقریب مرتبه اول به صورت مقدار نسبت حجمی فضای حذف شده لیتیوم نایوبایت ناشی از سونش، نسبت به حجم کل فضای نفوذ داده شده در رابطه (۱) (در شرایط بدون تپه) با نسبت وزنی مقدار نفوذ ($c(x,y)$) برآورد کرد. بنابراین با توجه به شکل خطی موج بر و در نتیجه شرایط نفوذ دو بعدی، مقدار این اختلاف که بصورت ضریب نسبی کمتر از یک خواهد بود با انتگرال سطحی با رابطه (۵) قابل محاسبه است

$$\alpha = \frac{\oint_{S_1} c(x,y) dx dy}{\oint_{S_o} c(x,y) dx dy}, \quad (5)$$

که در آن S_o کل سطح مقطع موج بر معمولی بدون تپه است و S_1 کل سطحی است که با تپه‌ای شدن موج بر از سطح S_o کم



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) توزیع اختلاف ضریب شکست عادی برای ضخامت تیتانیوم 100 نانومتر و زمان نفوذ 7 ساعت در دمای 1050 درجه (الف) تصویر سه بعدی (ب) توزیع در عمق‌های مختلف (ج) توزیع در عرض‌های مختلف.

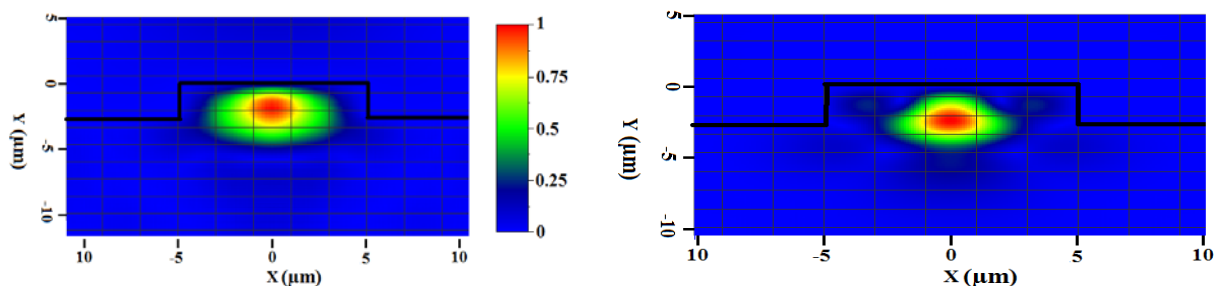
تأثیر اضافه کردن نقص‌ها در لبه موج‌بر در مقدار تلفات نور منتشر شده محاسبه می‌شود.

در روش انتشار پرتو از نور ورودی گاوسی با نیم پهنای 4.5 میکرومتر و در طول موج 650 نانومتر استفاده شد. برای شبیه‌سازی نقص‌ها، در طول موج‌بر، نقص‌هایی با اندازه‌های مختلف با چگالی متوسط یک نقص در دو میکرومتر به صورت تصادفی اعمال گردید و تأثیر آنها در افزایش تلفات موج‌بر نسبت به حالت بدون نقص به دست آمد.

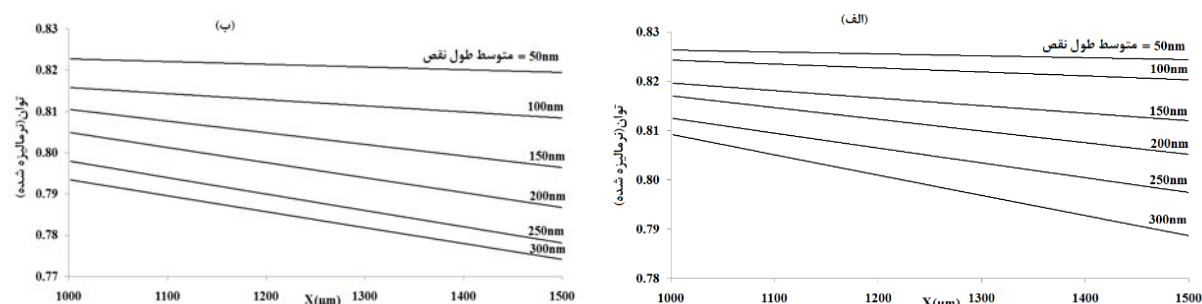
به عنوان نمونه برای شبیه‌سازی تأثیر اندازه نقص 200 nm، در طول موج‌بر در فاصله‌های تصادفی با متوسط فاصله دو

شکست با حذف ناحیه کناری در حالت عدم اعمال ضریب تصحیح α ناشی از رابطه (۶) را نشان می‌دهد. به همین ترتیب توزیع ضریب شکست برای قطبش غیرعادی و همین‌طور توزیع ضریب شکست‌های تعدیل شده با اعمال ضریب تصحیح α نیز محاسبه می‌شوند (که به علت اختصار از ارائه شکل‌های مربوطه صرف نظر شده است).

در ادامه، با استفاده از توزیع ضریب شکست‌های محاسبه شده و به وسیله شبیه‌سازی با روش انتشار پرتو، برای هر دو حالت با و بدون اعمال ضریب تصحیح α ، نحوه انتشار نور درون موج‌بر و شکل مد انتشاری محاسبه می‌شود. در نهایت نیز



شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تصویر مد منتشر شده در موج بر تپه‌ای با عرض 10° میکرومتر و ارتفاع 2.5 میکرومتر (الف) مد TM (ب) مد TE.



شکل ۷. چگونگی کاهش توان نوری درون موج بر ناشی از اندازه نقص‌های مختلف در طول مسیر انتشار، (الف) مد TE (ب) مد TM. در این شکل قسمت ابتدایی موج بر به طول یک میلی‌متر حذف شده است که به علت سهم غالب تلفات توزیع، تلفات مربوط به تطبیق مد نور ورودی و مد موج بر در قسمت ابتدای موج بر، است.

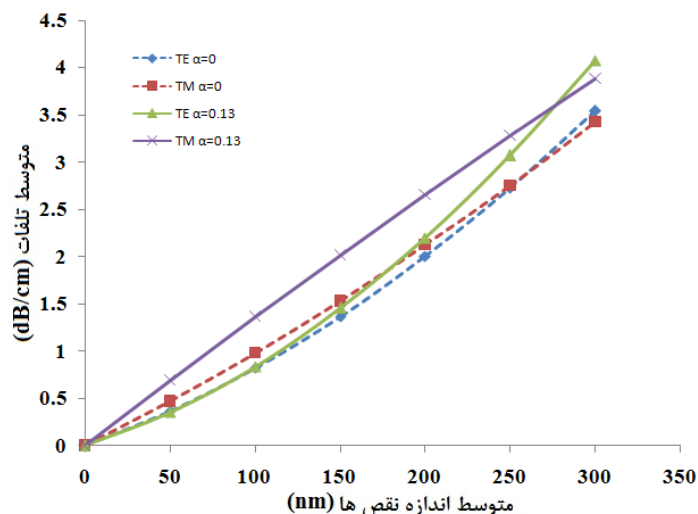
حالت توزیع تیتانیوم برای موج بر معمولی (بدون تپه) ($\alpha=0$) و با احتساب میزان تأثیرگذاری تپه در توزیع تیتانیوم ($\alpha=0.13$) رسم شده است.

با استفاده از شکل‌های مد شبیه‌سازی شده در نقاط مختلف مسیر انتشار درون موج بر و متوسط‌گیری از آن، سهم مد انتشاری درون بخش تپه‌ای موج بر، حدود 56% درصد به دست آمد. همچنین سهم مد انتشاری درون بخش تپه‌ای از نتایج تجربی (شکل ۴) نیز حدود 55% به دست آمد که تطبیق خوبی (بیش از 95%) با نتایج شبیه‌سازی دارد، که این نشان‌دهنده مناسب بودن تقریب مورد استفاده در محاسبه توزیع ضریب شکست است.

در شکل ۸ نیز مشخص است که مقدار تلفات برای اندازه نقص متوسط 200 نانومتر، برای مد TE، 2.2 dB/cm و برای مد TM، 2.65 dB/cm است. در این شکل، مقدار تلفات برای دو حالت توزیع ضریب شکست با و بدون در نظر گرفتن ضریب تصحیح α ، محاسبه شده است. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده

میکرومتر تغییر در عرض موج بر به اندازه‌های تصادفی در محدوده 50 ± 200 nm اعمال شده است. فاصله متوسط دو میکرومتر و همین طور اندازه نقص‌ها با توجه به نتایج مشاهده شده در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی انتخاب شده است، البته برای بررسی بیشتر اثر تأثیر اندازه نقص‌ها، نمونه‌های دیگری از موج‌برها با اعمال نقص‌هایی به اندازه متوسط 50 تا 350 نانومتر نیز شبیه‌سازی شده‌اند.

نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های ۶ تا ۸ ارائه شده است. همان طور که در رابطه (۷) عنوان شده است میزان اختلاف ضریب شکست عادی و غیر عادی با هم متفاوت است. بنابراین شبیه‌سازی برای هر دو قطبش عادی و غیر عادی که معادل دو مد TE و TM می‌باشند، شبیه‌سازی شده است. در شکل ۶، مد انتشاری درون موج بر و در شکل ۷، تلفات نور در طول مسیر انتشار درون موج بر برای دو مد TE و TM، برای اندازه نقص‌های مختلف ارائه شده است. در شکل ۸ نیز مقدار تلفات در واحد طول موج بر، بر حسب متوسط اندازه نقص‌ها، برای دو



شکل ۸ (رنگی در نسخه الکترونیکی) میزان تلفات موج بر پله‌ای به ارتفاع ۲/۵ میکرومتر و با عرض ۱۰ میکرومتر، به ازای اندازه نقص‌های مختلف. خطوط نقطه‌چین و توپر به ترتیب مربوط به توزیع ضریب شکست بدون و با اعمال ضریب تصحیح α است.

چند نسبت به موج‌برهای معمولی (بدون تپه) بیشتر است اما با توجه به این که برای کاربرد در مدوله‌کننده‌های سریع، ضریب بسامد بیش از مقدار تلفات نوری موج‌بر اهمیت دارد، بنابراین با توجه به قابلیت موج‌برهای تپه‌ای در افزایش بسامد، روش مورد استفاده با وجود تلفات به دست آمده (که برای مدوله‌کننده‌هایی با طول متداول یک سانتی‌متر حدود ۴۰٪ و ۵۶٪ برای مد TE و TM است)، قابل استفاده خواهد بود. البته برای کاهش مقدار تلفات می‌توان از روش‌های لیتوگرافی مستقیم (بدون پوشش) از جمله لیتوگرافی باریکه الکترونی برای کاهش مقدار نقص‌ها استفاده کرد.

اختلاف کم این دو حالت (کمتر از ۲۰٪) برای اندازه نقص‌های کمتر از ۲۵۰ نانومتر است که برآوردی از حداکثر خطای تقریب مورد استفاده در شبیه‌سازی را ارائه می‌دهد.

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک روش ساده‌ای مبتنی بر سونش فیزیکی برای ساخت موج‌برهای تپه‌ای در لیتیوم نایوبایت ارائه شد. با توجه به ایجاد نقص‌هایی در دیواره این نوع از موج‌برها با ابعاد حدود ۲۰۰ نانومتر، تأثیر این نقص‌ها در تلفات نور درون موج‌بر تپه‌ای با استفاده از شبیه‌سازی برای مد TE و TM به ترتیب حدود ۲/۲ dB/cm و ۲/۶۵ dB/cm به دست آمد. این مقدار تلفات هر

مراجع

- W K Burns, M M Howerton, R P Moeller, R Krähenbühl, R W McElhanon, and A S Greenblatt, *J. Light. Tech.* **17**, 12 (1999) 2551.
- H Hu, A P Milenin, R B Wehrspohn, H Hermann, and W Sohler, *J. Vac. Sci. Tech.* **24**, 4 (2006) 1012.
- Z Ren, P J Heard, J M Marshall, P A Thomas, and S Yu, *J. Appl. Phys.* **103**, 3 (2008) 034109.
- S Benchabane, L Robert, J Y Rauch, A Khelif, and V Laude, *J. App. Phys.* **105** (2009) 094109.
- D Jun, J Wei, C E Png, S Guangyuan, J Son, H
- K Noguchi, H Miyazawa, and O Mitomi, *Elec. Lett.* **30**, 12 (1994) 949.
- K Noguchi, "Lithium Niobate Modulators", edited by A Chen and E J Murphy, CRC Press, Boca Raton (2012).
- M Bazzan and C Sada, *J. Appl. Phys. Rev.* **2**, 4 (2015) 040603.
- Y S Yim and S Y Shin, *Opt. Comm.* **152** (1998) 225.
- C T Lee, and W H Huang, *Mic. Opt. Tech. Lett.* **53**, 3 (2011) 565.

18. S Salemian and S Mohammadnejad, *App. Elec.* (2009) 225.
19. P Ganguly, J C Biswas, and S K Lahiri, *J. Opt.* **39**, 4 (2010) 175.
20. S K Korotky, W J Minford, L L Buhl, M D Divino, and R C Alferness, *Trans. Mic. Theo. Tech.* **30**, 10 (1982) 1784.
21. P R Hua, B C Zhao, F Han, D Yu, E Y Pun, and D L. Zhang, *IEEE Phot. J.* **4**, 2 (2012) 520.
22. D L Zhang, Z Yang, W H Wong and E Y B. Pun, *Phil. Mag.* **87**, 1 (2007) 63.
23. M L Calvo and V Lakshminarayanan, "Optical Waveguides", CRC Press (2007).
24. E Strake, G P Bava, and I Montrosset, *J. Light W. Tech.* **6**, 6 (1988) 1126.
25. B Brecht, A Eckstein, A Christ, H Suchel and C. Silberhorn, *New J. Phys.* **13** (2011) 65029.
- Yang, and A J Danner, *J. Vac. Sci. Tech.* **30** (2012) 011208.
11. G Ulliac, B Guichardaz, J Y Rauch, S Queste, S Benchabane, and N Courjal, *Mic. Eng.* **88** (2011) 2417.
12. G Ulliac, N Courjal, H M H Chong, and R M De La Rue, *Opt. Mat.* **31** (2008) 196.
13. H Hu, R Ricken, W Sohler, and R B Wehrspohn, *Photon. Tech. Lett.* **19**, 6 (2007) 417.
14. G Ulliac, A Lecestre, B Guichardaz, J Dahdah, F I Baida, M P Bernal, and N Courjal, *Mic. Eng.* **97** (2012) 185.
15. H Hu, A P Milenin, R B Wehrspohn, H Hermann, and W Sohler, *J. Vac. Sci. Tech. A* **24** (2006) 1012.
16. M Fukuma, J Noda, and H Iwasak, *J. App. Phys.* **49**, 7 (1978) 3693.
17. Marco Bazzan and Cinzia Sada, *J. App. Phys. Reviews* **2** (2015) 040603.