



ساخت و تعیین ویژگیهای پرتوشکافهای قطبشی چندلایه

مهرداد شکوه صارمی* سیدحسین کشمیری* مجتبی میرصالحی* محمدمهدی باقری محقق**

* گروه برق دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، صندوق پستی ۹۱۷۷۵-۱۱۱۱

** آزمایشگاه تحقیقاتی میکروالکترونیک دانشگاه فردوسی مشهد

فاکس: ۸۳۶۴۳۳ (۰۵۱)

پست الکترونیکی keshmiri@science1.um.ac.ir

چکیده. در این مقاله دو نوع پرتوشکاف قطبشی چندلایه را با استفاده از الگوریتم ژنتیک طراحی کرده و سپس بر اساس نتایج نظری، نمونه هایی به صورت تجربی ساخته و مشخصات طیفی آنها را اندازه گیری نموده ایم. در انتها نیز به بررسی عوامل خطا که باعث فاصله گرفتن نتایج نظری و تجربی از یکدیگر می شود، پرداخته ایم.

کلمات کلیدی. مخابرات نوری، فیلترهای نوری، پرتوشکافهای قطبشی، لایه نشانی در خلاء.

۱- مقدمه

در مقاله ای که سال گذشته در کنفرانس مهندسی برق ارائه شد [۱]، طراحی پرتوشکافهای قطبشی به کمک الگوریتم ژنتیک شرح داده شده است. در این مقاله، در ادامه کار قبلی، گزارشی از ساخت و تعیین ویژگیهای پرتوشکافهای قطبشی (طراحی شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک) ارائه می شود. برای جلوگیری از تکرار مطالب، معرفی پرتوشکافهای قطبشی و طراحی آنها با استفاده از الگوریتم ژنتیک که در مرجع [۱] ذکر شده است در اینجا آورده نمی شود.

در بخش دوم مقاله، مراحل مختلفی که برای ساخت پرتوشکافهای قطبشی چند لایه مورد استفاده قرار گرفته است و نیز نحوه اندازه گیری ضخامت لایه ها و مشخصات اپتیکی آنها شرح داده می شود. معمولاً پرتوشکافهای قطبشی چند لایه به دو نوع مسطح و مکعبی ساخته می شوند [۲]. طراحی و ساخت یک نمونه پرتوشکاف قطبشی مسطح که برای طول موج مرئی ۶۳۲/۸ نانومتر در نظر گرفته شده است در بخش سوم مقاله شرح داده می شود و مشخصه طیفی نظری و عملی فیلتر ساخته شده با یکدیگر مقایسه می گردد. در بخش چهارم به صورت مشابه نتایج طراحی یک پرتوشکاف قطبشی مکعبی برای همان

طول موج ارائه و با مشخصه اندازه‌گیری شده مقایسه می‌شود. آخرین بخش مقاله به نتیجه‌گیری مطالب ارائه شده و بررسی عوامل خطا در نتایج عملی به دست آمده اختصاص دارد.

۲- مراحل ساخت پرتوشکافهای قطبشی

برای ساخت فیلترهای نوری چند لایه، معمولاً از تکنیک لایه نشانی بخار فیزیکی (PVD) استفاده می‌شود. در این روش، با تبخیر ماده در خلأ، یک لایه نازک بر روی زیرلایه یا لایه‌های دیگر نشانداده می‌شود. از مهمترین روشهای جایگذاری فیزیکی می‌توان روش تبخیر حرارتی در خلأ و اسپاترینگ را نام برد [۳]. در این مقاله برای ساخت فیلترها با روش تبخیر حرارتی در خلأ، از یک دستگاه تبخیر حرارتی مدل EDWARDS E306A استفاده شده است. ابتدا زیرلایه با محلولهای مخصوص شستشو، تمیز و خشک می‌شود و سپس در محفظه خلأ دستگاه تبخیر حرارتی در یک فاصله مناسب از منبع تبخیر یا قایق (Boat) قرار داده می‌شود. بعد از رسیدن دستگاه به خلأ مناسب (در حدود 10^{-6} میلی بار)، موادی که از قبل با توجه به خصوصیات اپتیکی و ضریب شکست انتخاب شده‌اند [۴]، با اعمال جریان الکتریکی به قایق، تبخیر شده و بر روی زیرلایه نشانداده می‌شوند. برای جایگذاری فیلترهای چند لایه، می‌توان از دو یا چند قایق برای تبخیر پیاپی چند ماده در سیستم خلأ استفاده کرد.

برای اندازه‌گیری ضخامت لایه‌ها در حین لایه گذاری از یک دستگاه ضخامت سنج بلور کوارتز مدل EDWARDS FTM-4 که آهنگ جایگذاری و ضخامت کل لایه را نشان می‌دهد، استفاده شده است. سیستم ضخامت سنج فوق دارای بلور کوارتزی است که در محفظه خلأ در نزدیکی نمونه قرار داده می‌شود. در هنگام لایه‌گذاری و تبخیر، بخار ماده به طور همزمان بر روی نمونه و بلور می‌نشیند. بر اثر تغییر جرم بلور و در نهایت تغییر فرکانس نوسان آن، ضخامت لحظه‌ای و آهنگ لایه نشانی بر روی نمایش دهنده دستگاه ضخامت سنج، نشان داده می‌شود. در این مرحله تعیین ضخامت دقیق لایه اپتیکی بسیار مهم است. بر این اساس چند پارامتر اصلی برای دستگاه ضخامت سنج تعریف شده که باید توسط کاربر به دستگاه وارد شود. این پارامترها عبارتند از: (۱) چگالی ماده (۲) امپدانس آکوستیکی ماده و (۳) فاکتور تصحیح نسبت فاصله بلور نوسان کننده و زیرلایه تا منبع تبخیر.

بعد از ساخت فیلتر مورد نیاز به این روش، اندازه‌گیری مشخصات اپتیکی لایه (مانند ضرایب گذر و بازتاب) توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر Perkin Elmer مدل Lambda-9 انجام شده است. این دستگاه دارای دو پرتو نور است (هر دو پرتو از یک منبع نوری سرچشمه گرفته‌اند) که یکی مرجع و دیگری شیئی است که برای اندازه‌گیری مشخصات فیلتر بکار می‌رود. در ابتدای کار باید دستگاه کالیبره شود تا دو پرتو ذکر شده با هم معادل گردند. همچنین با قرار دادن قطبیده‌های مسطح در مسیر این دو پرتو می‌توان دستگاه را برای قطبش دلخواه P و S نیز کالیبره کرد. سپس نمونه در مسیر پرتو شیئی قرار گرفته و طول موج پرتوها در بازه مورد نظر تغییر داده می‌شود. آشکارسازهای دستگاه، تغییرات پرتو شیئی نسبت به مرجع را آشکار کرده و مشخصات طیفی نمونه را اندازه‌گیری می‌کنند.

۳- طراحی و ساخت پرتوشکاف قطبشی مسطح

برای ساخت پرتوشکاف قطبشی مسطح، ساختاری که از طراحی به کمک الگوریتم ژنتیک بدست آمده است (شامل ضرایب شکست و ضخامت فیزیکی لایه‌ها) مستقیماً بر روی زیر لایه شیشه ای مسطح نشانده می‌شود. در طراحی پرتوشکافهای قطبشی هدف آن است که ضریب بازتاب قطبش S (R_S) حداکثر (یک) و ضریب بازتاب قطبش P (R_P) حداقل (صفر) شود. میزان کیفیت یک پرتوشکاف قطبشی در یک طول موج با درجه قطبش آن (P) و با استفاده از یکی از روابط زیر مشخص می‌شود.

$$P = \frac{|T_S - T_P|}{|T_S + T_P|} \quad \text{یا} \quad P = \frac{|R_S - R_P|}{|R_S + R_P|} \quad (1)$$

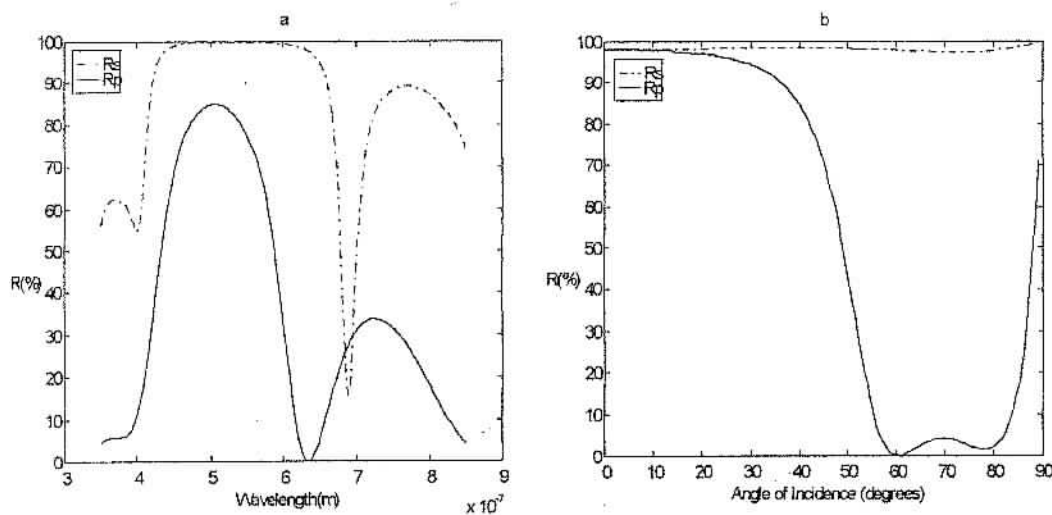
هدف اصلی در این تحقیق، طراحی پرتوشکافهای قطبشی در طول موجهای مخابراتی بوده است. ولی پرتوشکافهایی که در اینجا معرفی می‌شوند، حول طول موج مرئی $632/8$ نانومتر طراحی شده اند که البته تفاوت زیادی بین این دو نوع طراحی بجز در ضخامت لایه‌ها وجود ندارد. کار ساخت در طول موجهای مرئی به علت نازکتر بودن لایه‌ها ساده‌تر می‌باشد و از طرفی در باند مرئی می‌توان میزان جداسازی قطبشها را به طور شهودی و با استفاده از لیزر هلیوم-نئون و قطبنده‌های مسطح چرخان ملاحظه کرد.

رابطه ۲ ساختمان ضریب شکستی پرتوشکاف قطبشی مسطح طراحی شده با الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد که ضخامت لایه‌ها بر حسب ضریبی از طول موج مرکزی بیان شده است. مواد بکار رفته در ساخت فیلتر از مواد عایق و شفاف در گستره مرئی [ZnS ($n_H=2.345$) و MgF_2 ($n_L=1.365$)] انتخاب شده اند.

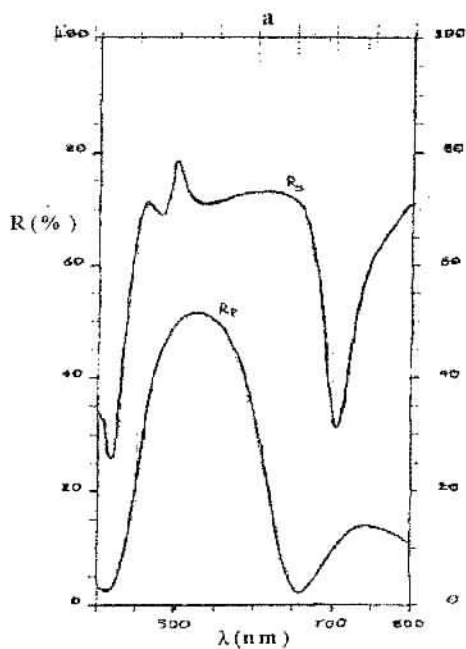
$$Air | 0.123n_H, 0.193n_L, 0.103n_H, 0.153n_L, 0.085n_H, 0.165n_L, 0.091n_H, 0.203n_L, 0.106n_H, 0.25n_L | Glass \quad (2)$$

در رابطه فوق، n_H و n_L ضرایب شکست لایه و عدد قبل از آنها نسبت ضخامت لایه به طول موج مرکزی را نشان می‌دهد. زاویه تابش برابر 60° درجه، طول موج مرکزی تابش $632/8$ نانومتر و پهنای نوار فیلتر در طراحی برابر 5 نانومتر می‌باشد. مشخصات طیفی نظری این فیلتر در شکل ۱ نشان داده شده است. مشخصات طیفی فیلتر ساخته شده برای دو قطبش S و P که توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر اندازه‌گیری شده است در شکل ۲ نشان داده شده است.

با مقایسه مشخصه طیفی نظری و عملی فیلتر ساخته شده، مشاهده می‌شود که بین این دو مشخصه هماهنگی مناسبی وجود دارد و رفتار پرتوشکافی با درجه بالا صورت می‌گیرد. تنها مسأله‌ای که بین نتایج نظری و تجربی تفاوت ایجاد کرده است، انتقال در محور طول موج و میزان ضریب بازتاب می‌باشد که این مطلب در بخش نتیجه‌گیری مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱. مشخصات طیفی پرتوشکاف مسطح طراحی شده (a) بر حسب طول موج و (b) بر حسب زاویه تابش در $1332/8$ نانومتر.



شکل ۲. مشخصه طیفی تجربی پرتوشکاف مسطح.

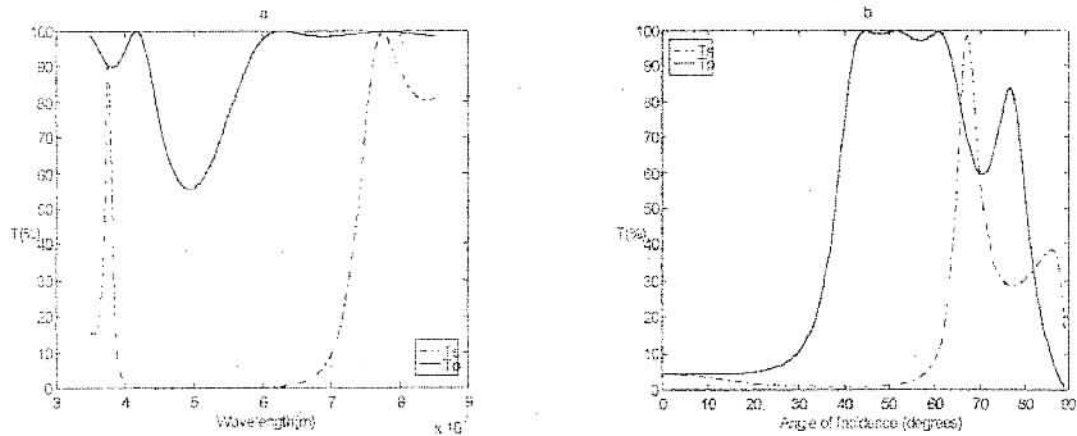
۴- طراحی و ساخت پرتوشکاف مکعبی

عمل لایه نشانی در این نوع پرتوشکافها بر روی قاعده یک منشور قائم صورت می گیرد. با استفاده از چسب اپتیکی Norland 65 منشور مشابهی از طرف قاعده برای ایجاد یک مکعب به منشور اولیه

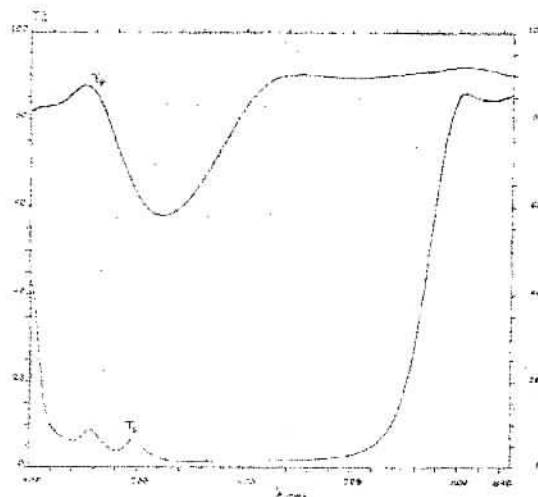
چسبیده می شود. ساختار ضریب شکستی پرتوشکاف مکعبی طراحی شده با الگوریتم ژنتیک در رابطه زیر آمده است که ضخامت لایه ها بر حسب ضریبی از طول موج مرکزی بیان شده است.

$$\text{Glass } 0.074n_f, 0.228n_f, 0.101n_f, 0.238n_f, 0.111n_f, 0.236n_f, 0.086n_f, 0.225n_f, 0.103n_f, \text{Glass} \quad (3)$$

در این طراحی از دو ماده ZnS و Cryolite ($n_f=1.35$) استفاده شده است. زاویه تابش در منشور برابر ۴۵ درجه. طول موج مرکزی ۶۳۲/۸ نانومتر و پهنای نوار ۸۰ نانومتر می باشد. مشخصات نظری این فیلتر در شکل ۳ آمده است. براساس طراحی موجود، این فیلتر با استفاده از مواد فوق با لایه نشانی در حلال ساخته شد. مشخصه طیفی فیلتر ساخته شده که با اسپکتروفوتومتر اندازه گیری شده، در شکل ۴ آمده است. در اینجا نیز تفاوت نتایج در انتقال طول موجی و میزان ضریب بازتاب مشاهده می شود. در این حالت بازتاب از وجوه منشورها نیز در نتایج عملی مؤثر است ولی به هر حال میزان جداسازی قطبش ها و درجه پلاریزاسیون در گستره مورد نظر مناسب و قابل قبول است.



شکل ۳. مشخصات طیفی پرتوشکاف مکعبی طراحی شده (a) بر حسب طول موج و (b) بر حسب زاویه تابش در ۶۳۲/۸



شکل ۴. مشخصه طیفی تجربی پرتوشکاف مکعبی.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، گزارشی در مورد ساخت و تعیین ویژگیهای پرتوشکافهای قطبشی که با استفاده از الگوریتم ژنتیک طراحی شده اند، ارائه شده است. دو نوع پرتوشکاف مسطح و مکعبی طراحی و ساخته شده اند و مشخصات طیفی آنها اندازه گیری و با نتایج نظری مقایسه گردیده است. درجه قطبش فیلترهای ساخته شده مناسب و قابل قبول است و رفتارهای مشخصه های طیفی نظری و عملی با هم هماهنگی دارد. تفاوت اساسی بین نتایج در جابجایی طول موجی مشخصه های عملی نسبت به نظری و میزان ضرایب بازتاب (R_p و R_s) می باشد. این تفاوت مربوط به خطاهای سیستماتیکی است که در مرحله ساخت و اندازه گیری مشخصات بوجود می آید.

با توجه به ماهیت روند ساخت فیلترها طبق آنچه شرح داده شد، خطا در چنین سیستمی جمع شونده است یعنی خطا در هر مرحله روی مراحل بعدی اثر می گذارد. در حالت کلی مجموعه خطاهایی که در روند ساخت پوششهای نوری ایجاد می شود، دارای توزیع نرمال است که واریانس آن با توجه به موارد خاص ایجاد خطا محاسبه شده است [5].

یکی از عوامل خطا در دسترس نبودن رابطه بستگی ضریب شکست مواد به طول موج تابش (یا معادله پاشندگی مواد مورد نظر) است. در این مقاله، در مرحله طراحی برای هر ماده در نوار طول موجی مورد نظر ضریب شکست ثابت در نظر گرفته شده است (که این کار روشی مرسوم می باشد) ولی در عمل مواد در هر طول موج ضریب شکست خاصی دارند که این باعث فاصله گرفتن نتایج نظری و عملی از هم می شود. از طرفی باید گفت که بعضی از پوششهای نوری حساسیت شدیدی به این تغییرات ضریب شکست دارند که از جمله آنها قطبنده ها و پرتوشکافهای خنثی هستند [5].

عامل دیگر ایجاد خطا، در دسترس نبودن پارامترهای دقیق برای ضخامت سنجی مانند چگالی و امپدانس صوتی مواد است. برای برخی مواد که در فرآیند لایه نشانی استفاده شده اند، این مشخصات به طور دقیق وجود نداشته و در دسترس نبوده است. امپدانس صوتی پارامتری است که میزان تفاوت نوسانگری ماده لایه نشانی را با بلور کوآرتز دستگاه ضخامت سنج مشخص می کند. در دسترس نبودن این پارامتر باعث می شود تا ضخامتهای نشانده شده با ضخامتهای مطلوب تفاوت داشته باشد. فیلترهای نوار باریک شدیداً به تغییرات ضخامت و پوششهای ضدبازتاب، فیلترهای لبه ای و پوششهای نوار پهن به تغییرات ضریب شکست و ضخامت لایه ها حساسیت دارند [5].

خطاهای انسانی در اندازه گیری فواصل فیزیکی برای محاسبه فاکتور تصحیح فاصله در دستگاه ضخامت سنج و یکنواخت نبودن ضخامت لایه ها در روی تمامی سطح نمونه های ساخته شده در هر مرحله نیز از عوامل ایجاد خطا در فرآیند ساخت هستند.

از عوامل خطا در مرحله اندازه گیری می توان عدم دقت در تنظیم و کالیبراسیون دستگاه اسپکتروفوتومتر و عدم دقت در محل قرارگیری نمونه ها در هنگام اندازه گیری مشخصات طیفی را ذکر کرد. علت بروز این خطاها آن است که قسمتی از کارهای تنظیم به صورت دستی و توسط کاربر انجام می گیرد که این کار

باعث وارد شدن خطا می‌شود. از طرفی چون دستگاه اسپکتروفوتومتر دارای قطبده‌های جانبی برای ایجاد قطبشهای S و P به صورت مجزا نمی‌باشد، در عمل از قطبده‌های مسطح معمولی استفاده شده که به کارگیری آنها نیز باعث ایجاد خطا می‌گردد. همچنین در اندازه‌گیریهای انجام شده اثر زیرلایه در نمونه‌ها حذف نشده است.

علیرغم خطاهای فوق، طراحی به کمک الگوریتم ژنتیک نتایج عملی مناسبی داشته و از نظر تنوری هم نسبت به مدل‌های دیگر نتایج قابل قبول و با کیفیت مناسبی ارائه نموده است. تا آنجایی که ما اطلاع داریم این نخستین یاری است که از الگوریتم ژنتیک برای طراحی پرتوشکاف قطبشی استفاده شده است و در ایران نیز ساخت پرتوشکاف قطبشی چند لایه قبلاً صورت نگرفته است. با توجه به اهمیتی که این قطعات در مخابرات نوری و سیستم‌های نوری دارند [۹][۸][۷][۶] قصد داریم کار در این زمینه را ادامه دهیم و در مورد بهبود نرم افزار و در نظر گرفتن مسائل عملی در طراحی و ساخت فیلترهای نوری چندلایه تحقیق کنیم.

در پایان لازم است تا از همکارانمان در آزمایشگاه تحقیقاتی میکروالکترونیک دانشگاه فردوسی مشهد به خصوص آقای مهندس مرتضی نوریان تشکر و قدردانی نماییم.

مراجع

- [۱] مهرداد شکوه صارمی، مرتضی نوریان، مجتبی میرصالحی و سیدحسین کشمیری، "طراحی پرتوشکافهای قطبشی با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، ششمین کنفرانس مهندسی برق ایران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، اردیبهشت ۱۳۷۷.
- [2] H. A. MacLeod, *Thin Film Optical Filters*, Adam Hilger, 1986.
- [3] K. L. Chopra and I. Kaur, *Thin Film Devices Applications*, Plenum Press, 1983.
- [4] Balzers Ltd., *Coating Materials, Sputtering Targets and Evaporation Sources*, 1987.
- [5] A. Thelen, *Design of Optical Interference Coatings*, McGraw-Hill, 1989.
- [6] L. G. Kazovsky, "Phase and polarization diversity coherent optical techniques," *J. Lightwave Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 279-292, Feb. 1989.
- [7] K. W. Cheung, "Acoustooptic tunable filters in narrowband WDM networks: system issues and network applications," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 8, no. 6, pp. 1015-1025, Aug. 1990.
- [8] S. Y. Kim, S. B. Lee, J. Chung, I. J. Park, J. Jeong and S. S. Choi, "Highly stable optical add/drop multiplexers using polarization beamsplitters and fiber bragg gratings," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, no. 8, pp. 1119-1121, Aug. 1997.
- [9] J. J. Pan and Y. Shi, "Polarizing beamsplitter trims noise in EDFAs," *Laser Focus World*, vol. 32, no. 1, pp. 93-99, Jan. 1996.