

## طراحی و ساخت فیلتر نوار باریک چند لایه برای مخابرات نوری

مهرداد شکوه صارمی، علیرضا براتی، سیدحسین کشمیری

میرمجتبی میرصالحی

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه برق

### مقدمه

با گسترش سیستم‌های مخابرات نوری بر مبنای تقسیم طول موجی و مخصوصاً سیستم‌های WDM، نیاز روزافزونی به قطعاتی که بتوانند مستقیماً سیگنال‌های نوری را تحت تأثیر قرار دهند، به وجود آمده است. افزایش چگالی کانال‌ها و آهنگ اطلاعات در سیستم‌های WDM، نیازهای خاصی را برای ساخت وسایل نوری به همراه آورده است. از میان این مشخصات می‌توان به طول موج مرکزی دقیق، باند عبور با قله صاف و افت جایگذاری یکنواخت و کم، ایزوله‌سازی بالا بین کانال‌ها و شفافیت نسبت به آهنگ و قالب اطلاعات اشاره کرد.

از میان قطعاتی که با فناوری‌های مختلف برای سیستم‌های WDM ساخته شده‌اند، قطعاتی که براساس فناوری ساخت فیلترهای چند لایه تهیه شده‌اند، مشخصات بسیار خوبی را براساس نیاز در بالا اشاره شد، از خود به نمایش گذاشته‌اند. فیلترهای نوری چند لایه دارای کارایی زیادی در حذف پلکسی و وی‌لنر پلکسی هستند. به نسبت همی سینک‌ها، پرتوشکافی، هموار کردن بهره تقویت‌کننده‌های نوری و جداسازی باند طول موجی دارند. در بین فیلترهای نوری چند لایه، فیلترهای نوار باریک، چون می‌توانند به عنوان یک قطعه مؤثر در جداسازی کماندهای نوری به کار گرفته شوند، از اهمیت خاصی برخوردارند. عرض باند طول موج باریک، درصد عبور توان ( $T$ ) بالا در ناحیه عبور و درصد بازتابش توان ( $R$ ) بالا در خارج از ناحیه مورد نظر، از ویژگی‌های اصلی یک فیلتر نوار باریک مناسب است [۱] - [۳]. در این مقاله، طراحی و ساخت یک فیلتر نوری نوار باریک مورد نیاز مرکز تحقیقات مخابرات ایران با مشخصات تعیین شده گزارش می‌شود.

## فیلتر نوری و اپتوالکترونیک

### طراحی فیلترهای چند لایه با الگوریتم ژنتیک

طراحی فیلترهای نوری چند لایه با مشخصات دلخواه، در حین یک مسئله بهینه‌سازی است و متغیرهای این مسئله، ضخامت لایه‌ها و ضریب شکست آنها هستند. از میان روش‌های طراحی فیلترهای نوری چند لایه می‌توان به الگوریتم ژنتیک اشاره کرد. این الگوریتم ابزاری قدرتمند در حل مسایل بهینه‌سازی با متغیر زیاد و فضای جستجوی گسترده است. الگوریتم ژنتیک ریشه قوانین وراثتی حاکم بر طبیعت دارد و روشی پیشامدی است که به کارگیری قانونی به نام انتخاب طبیعی، به یافتن نقطه بهینه عمیق در فضای جستجو می‌پردازد. این روش به وسیله هالند در سال ۱۹۷۵ برای شبیه‌سازی قابلیت انعطاف و سازگاری موجودات با یک برنامه رایانه‌ای پیاده‌سازی و بعدها توسط پژوهشگر دیگری مانند گولدبرگ بهبود یافت. در الگوریتم ژنتیک، هر نقطه فضای جستجو به شکل یک رشته به نام کروموزوم نمایش داده می‌شود که واحدهای تشکیل‌دهنده آن را ژن می‌نامند.

در این الگوریتم، کروموزوم‌ها، بلوک‌های اصلی‌ای هستند که مورد پردازش قرار می‌گیرند. در طراحی فیلترهای چند لایه، در کروموزوم معادل یک فیلتر است که ژن‌های آن را ضرایب شکست ضخامت لایه‌ها تشکیل می‌دهند. از آنجایی که روش انگوری ژنتیک روشی تصادفی است، اولین نسل از فیلترها به طور تصادفی تولید می‌شوند و سپس عملگرهای ژنتیکی به ترتیب روی آنها اعمال می‌شود تا نسل جدیدی پدید آید.

اولین عملگر ژنتیکی که اعمال می‌شود، عملگر انتخاب است. از میان فیلترهای موجود، فیلترهای مناسب را برحسب نیازندگیشان جدا می‌کنند. تابع برازندگی هر فیلتر از کروموزوم به عده‌ای مناسب بودن آن است که معمولاً طوری انتخاب می‌شود که فیلترهای مناسب‌تر دارای تابع برازندگی بزرگتری باشند. عملگر بعدی، عملگر دورگه‌سازی است. این عملگر باعث انتقال حرم ژنتیکی بین کروموزوم‌ها می‌شود و اساس آن شکست کروموزوم و جابه‌جایی قطعات شکسته شده بین هر زوج کروموزوم انتخابی است. در نهایت عملگر جهش اعمال می‌شود تا به طور تصادفی

ژنتیکی رو  
ملگر، ابتدا تع  
ضخامت لای  
شده، تغییر  
دورگه‌ساز  
مناسب از اج  
مناسب ترین  
می‌آید [۵]

در مرحله‌های زیر  
۱. ایجاد نسل او  
ضخامت لایه‌ها  
۲. محاسبه تابع  
تابع به صورت

که در آن  
به دست آمده  
است.  
۳. مقایسه مقاد  
مشخص، اگر ق  
خواهد

۴. اعمال عمل  
(ایجاد نسل جدید)

۵. پایان الگوریتم.

### طراحی و ساخت فیلتر نوار باریک

در این تحقیق، هدف طراحی یک فیلتر نوار باریک با مشخصات زیر بوده است:

- ضریب عبور توان در طول موج مرکزی ( $\lambda_c = 1.55 \mu m$ ) حداقل ۹۰٪
- ضریب عبور توان در طول موج‌های جانبی ( $\lambda_1 = 1.40 \mu m$  و  $\lambda_2 = 1.70 \mu m$ ) حداکثر ۱۰٪
- پهنای نسبی نوار  $\Delta\lambda_{1/2}/\lambda_c$  حداکثر ۵٪

برای طراحی این فیلتر، با توجه به مشخصات مورد نیاز از دو ماده با ضرایب شکست ۲۹۱۶ (CdTe) و ۱۳۳۶ (MgF<sub>2</sub>) استفاده شده است. زیرلایه از جنس شیشه با ضریب شکست ۱٫۵۷ و محیط تابش هوا بوده است. همچنین زاویه تابش صفر درجه در نظر گرفته شده است. فیلتر طراحی شده دارای ۱۱ لایه است که جدول ۱ ساختار این فیلتر به شکل ۱، طیف عبوری محاسبه شده آن را نشان می‌دهند. مشخصات طیفی فیلتر طراحی شده عبارت‌اند از

$$T_{\lambda_1} = 0.42\% \quad , \quad T_{\lambda_2} = 99.16\% \quad , \quad \Delta\lambda_{1/2}/\lambda_c = 1.4\% \quad , \quad T_{\lambda_c} = 1.44\%$$

که در آن  $T_{\lambda_c}$  ضریب عبور در طول موج  $\lambda_c$  و  $\Delta\lambda_{1/2}$  پهنای طول موجی مربوط به  $\lambda_c$  است. همچنین  $\lambda_1$  و  $\lambda_2$  طول موج مرکزی به اتفاق می‌افتد است.

ت ژنتیکی روی برخی از کروموزوم‌ها ایجاد کند. برای اعمال عملگر، ابتدا تعدادی فیلتر به طور پیشامدی انتخاب می‌شوند و سپس ضخامت لایه‌ها و ضرایب شکست آنها طی روندی از پیش تعیین شده، تغییر داده می‌شوند. پس از اعمال مجموعه عملگرهای انتخاب، دورگه‌سازی و جهش. نسل جدیدی حاصل می‌شود. یک فیلتر مناسب از اجرای این الگوریتم، با مقایسه کردن تابع برازندگی مناسب‌ترین فیلتر در هر نسل با مقدار مطلوب از پیش تعیین شده، بدست می‌آید [۵]. می‌توان روند طراحی به کمک این الگوریتم را در مرحله‌های زیر خلاصه کرد:

۱. ایجاد نسل اول به‌طور پیشامدی (۲۵ فیلتر با تعداد لایه، ضخامت لایه‌ها و ضرایب شکست لایه‌ای پیشامدی).
۲. محاسبه تابع برازندگی برای تک‌تک فیلترهای این نسل که این تابع به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F = \frac{1}{\sum_i |T_{desired} - T_{design}|}$$

که در آن  $T_{desired}$  ضریب عبور مطلوب،  $T_{design}$  ضریب عبور به دست آمده از طراحی و جمع فوق در مقادیر  $n$  مورد نظر است.

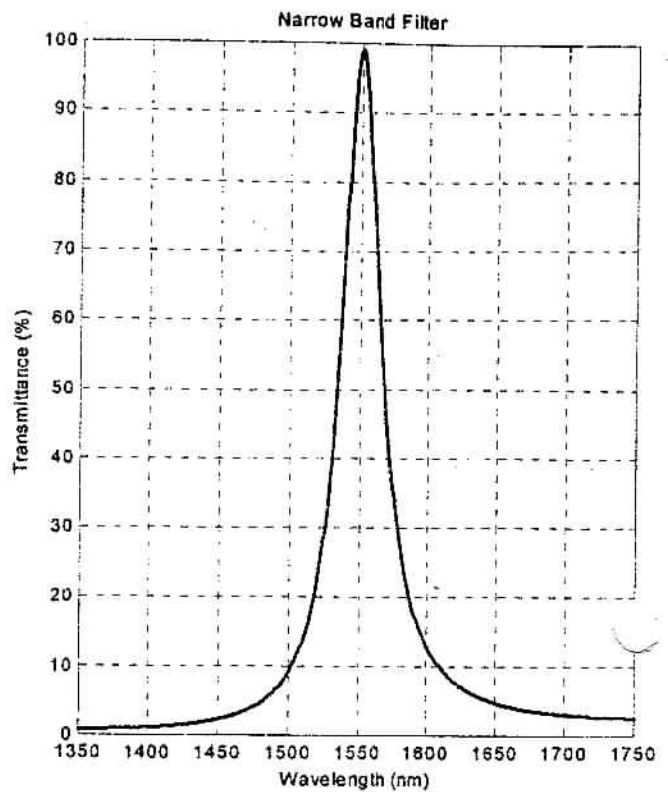
۳. به مقدار تابع برازندگی مناسب‌ترین فیلتر با مقداری مشخص، اگر تابع برازندگی از این مقدار بیشتر شد، پروسه به مرحله ۵ خواهد بود.
۴. اعمال عملگرهای انتخاب، دورگه‌سازی و جهش به ترتیب ایجاد نسل جدید و پروسه به مرحله ۲.

Layer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Refractive Index	L	H	L	H	L	H	L	H	L	H	L
Thickness [Å]	1147	1439	1704	1640	1675	3177	1654	1658	1687	1614	1187

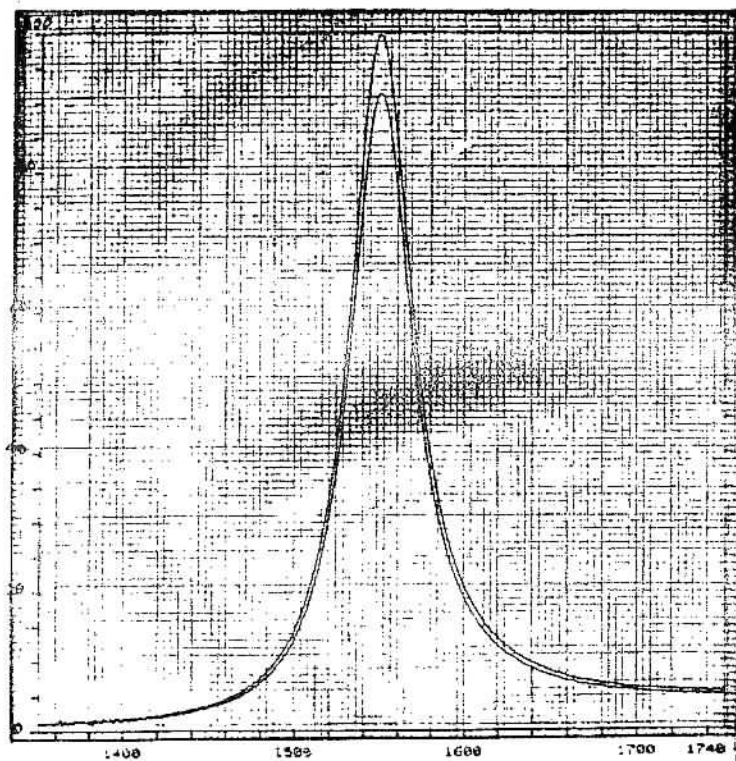
جدول ۱. ساختار فیلتر طراحی شده

برای ساخت این فیلتر از روش تبخیر گرمای مقاومتی در خلاء استفاده شده است. دستگاه لایه نشانی به کار رفته EDWARDS E306A بوده است. برای لایه نشانی، ابتدا زیر لایه به طور کامل تمیزکاری شده و در فاصله‌ای مناسب از قایق تبخیر در محفظه خلاء قرار داده شدند. همچنین مواد تبخیری مورد نیاز داخل دو قایق مولیبدنی متصل شده به منبع جریان، قرار گرفتند. دستگاه لایه نشانی طی دو مرحله به خلاء مورد نیاز (حدود  $10^{-6}$  torr) برای لایه نشانی رسید. از ضخامت سنج بطور FTM-4 برای سنجش ضخامت لایه‌ها استفاده شده و برای هر مرحله لایه نشانی، پارامترهای لازم مانند چگالی ماده، مقاومت ظاهری صوتی و ضریب نقش زدن به واحد نمایشگر ضخامت سنج وارد شدند.

پس از عمل لایه گذاری و نشانده شدن تمامی لایه‌ها، مشخص عبوری فیلتر توسط دستگاه طیف نورسنج پریکین-المر لاندن اندازه گیری شده است. نتایج حاصل از اندازه گیری در دو حالت حذف اثر زیر لایه و بدون آن در شکل ۲ آمده است.



شکل ۱. طیف عبوری فیلتر طراحی شده



شکل ۲. طیف عبوری فیلتر ساخته شده، الف) با حذف اثر زیر لایه و ب) بدون حذف اثر زیر لایه

توجه به ش...  
 نانومتر و ا...  
 بهترین، پهنای ب...  
 این ترتیب پهنای...  
 است. این...  
 برای مناسب بر...  
 دلخواه است و...  
 خطاهای ذاتی...  
 مناسبی است.  
 مرجع ها  
 murthy and B.  
 DM lightwave  
 p. 1274-1307,  
 filters are the  
 DM Solutions,  
 Bristol: Adam  
 ra, "Optimal  
 ded genetic  
 ), Dec. 1992.  
 ic algorithm  
 view," IEEE  
 1997.

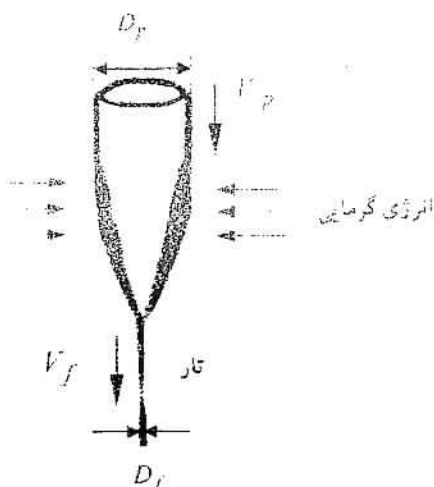
فرایند کشش

خط تولید تار است و دارای پارامترهایی است که برای یک تولید مطلوب همواره باید به طور دقیق بهینه و کنترل شوند. فرایند کشش توسط برج کشش صورت می‌گیرد که شامل قسمت‌های عمده از قبیل سیستم‌های اندازه‌گیری، کوره الکتریکی، سازوکار پوشش دهنده تار، لامپ فراینش و مدارهای کنترل است. فرایند کشش تار بدین ترتیب است که ابتدا دمایی در حدود ۲۰۰۰ درجه سانتیگراد توسط یک کوره در قسمت فوقانی برج به میله پیش‌سازه که در داخل آن قرار دارد اعمال می‌شود و تار تحت یک نیروی کشش با یک سرعت ثابت کشیده می‌شود. شکل ۱ چگونگی تبدیل یک پیش‌سازه به تار را نشان می‌دهد که در آن  $D_p$  قطر پیش‌سازه،  $D_f$  قطر تار کشیده شده،  $V_p$  سرعت تغذیه پیش‌سازه به داخل کوره، و  $V_f$  سرعت کشش تار هستند.

بنا به اصل پایستگی جرم در فرایند کشش تار، سرعت کشش تار را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$V_f = V_p \left[ \frac{D_p}{D_f} \right]^2 \quad (1)$$

فرایند کشش تار نوری از یک پیش‌سازه معمولاً تأثیرپذیر عواملی مانند دمای کشش، تنش و سرعت کشش است. برای مثال، تنش کششی اثر ساختاری نامطلوبی در تار می‌گذارد که باعث افزایش



شکل ۱. چگونگی تبدیل پیش‌سازه به تار در کوره

نوجه به شکل ۲ ملاحظه می‌شود که حداکثر عبور دقیقاً در  $40 \mu m$  نانومتر واقع شده و مقدار عبور در این طول موج ۹۹٪ است. همچنین، پهنای باند مربوط به نقاط نصف توان  $40 \mu m$  نانومتر است. به این ترتیب پهنای باند نسبی ۲۵۸٪ است که بهتر از مقدار مطلوب (۱۵) است. این نتیجه نشان‌دهنده آن است که الگوریتم ژنتیک برای مناسب برای طراحی فیلترهای نوری چند لایه با مشخصات دلخواه است و فیلتر ساخته شده براساس این الگوریتم، علی‌رغم خطاهای ذاتی در روند ساخت فیلتر، دارای مشخصات طیفی مناسبی است.

#### مرجع‌ها

1. M. S. Borella, J. Jue, D. Banerjee, B. Ramamurthy and B. Mukherjee, "Optical components for WDM lightwave networks," IEEE Proc. vol. 85, No. 8, pp. 1274-1307, Aug. 1997.
2. C. He, D. Ma and W. Z. Li, "Thin film filters are the building blocks of multiplexing devices," WDM Solutions, pp. 39-46, May 2001.
3. H. A. Macleod, Thin Film Optical Filters, Bristol: Adam Hilger, 1985.
4. E. Michielssen, S. Ranjithan and R. Mittra, "Optimal multilayer filter design using real coded genetic algorithms," IEE Proc. vol. 139, No. 6, pp. 413-420, Dec. 1997.
5. D. S. Weite and M. Michielssen, "Genetic algorithm optimization applied to electromagnetics: a review," IEEE Trans. Ant. Propag., vol. 45, No. 3, pp. 343-353, March 1997.

بهینه‌سازی ترمیمی پارامترهای کشش تار نوری در خط تولید

فرامرز اسمعیلی سراج

مجمع تولید فیبر نوری و برق خورشیدی، پونک، تهران

فرایند کشش پیش‌سازه و تبدیل آن به تازیکی از بخش‌های عمده در