

## طراحی پرتوشکافهای قطبشی با استفاده از آگوریتم ژنتیک

مهرداد شکوه صارمی مرتضی نوریان مجتبی میرصالحی سید حسین کشمیری

دانشگاه فردوسی مشهد

دانشکده مهندسی، گروه برق

صندوق پستی: ۱۱۱۱ - ۹۱۷۷۵

مشهد، ایران

پست الکترونیکی: [saremi@science1.um.ac.ir](mailto:saremi@science1.um.ac.ir)

### چکیده

فیلترهای نوری از قطعات پرکاربرد در اپتیک پیشرفته و مخابرات نوری هستند. طراحی این فیلترها با ویژگیهای دلخواه، معمولاً به یک مسأله بهینه‌سازی منجر میشود. از جمله فیلترهای نوری میتوان به پرتوشکافهای قطبشی<sup>۱</sup> اشاره کرد. کار این نوع فیلترها، جداسازی دو قطبش نوری متعامد  $p$  (TM) و  $s$  (TE) از یکدیگر میباشد. از کاربردهای پرتوشکافهای قطبشی، جداکردن دو قطبش نوری متعامد از هم و در نتیجه اطلاعات موجود روی آنها (مثلاً در مخابرات تار نوری) می‌باشد. در این پژوهش، طراحی پرتوشکافهای قطبشی به وسیله الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک انجام شده و نتایج مناسبی به دست آمده است.

واژه‌های کلیدی: لایه‌های نازک، فیلترهای نوری، پرتوشکافهای قطبشی، الگوریتم ژنتیک.

### ۱- مقدمه

پرتوشکافهای قطبشی نوعی فیلتر نوری هستند که میتوانند دو قطبش متعامد  $s$  (TE) و  $p$  (TM) را از یکدیگر جدا کنند. مبنای طراحی و ساخت پرتوشکافهای قطبشی و بیشتر فیلترهای نوری بر نظریه لایه‌های نازک استوار

است [1][2]. لایه نازک به لایه‌ای از یک ماده با ضریب شکست مشخص گویند که دو بازتابش متوالی از دو مرز آن، اختلاف راهی کمتر از طول موج نور تابشی ایجاد نماید. روابط مرزی الکترومغناطیس اساسی‌ترین روابط حاکم بر این لایه‌ها هستند [1]. پرتوشکافهای قطبشی بر دو نوع مکعبی<sup>۲</sup> و مسطح<sup>۳</sup> می‌باشند. در نوع مکعبی، لایه‌های نازک بر روی قاعده یک منشور نشانیده میشوند و سپس منشور دیگری به منشور نخست به گونه‌ای چسبانیده میشود که یک مکعب حاصل شود. در انواع مسطح، لایه‌ها را بر روی زیر لایه‌ای مسطح و عمده‌تاً شیشه‌ای می‌نشانند. پوششی که معمولاً در فیلترهای نوری برای ساده‌تر شدن طراحی و ساخت استفاده میشود، پوشش ربع طول‌موجی است که در آن ضخامت موثر لایه، یک‌چهارم طول‌موج مرکزی تابش است [2][3].

در سال ۱۹۴۶ برای اولین بار، مک‌نیل<sup>۴</sup> پرتوشکاف قطبشی از نوع مکعبی را طراحی کرد [2]. پس از آن، پرتوشکافهای قطبشی به عنوان نوعی فیلتر نوری جای خود را در اپتیک پیشرفته باز کردند. یکی از کاربردهای این

۱- Polarizing Beam Splitters

۲- Cube Polarizing Beam Splitter

۳- Plate Polarizing Beam Splitter  
۴- MacNielle

دامنه میدان عبوری از سیستم و  $B_0$  دامنه میدان تابشی در زیرلایه (معمولاً صفر) هستند.  $P_1$  ماتریس گذر لایه‌ای و ماتریسهای  $D_l$  ماتریسهای دینامیکی می‌باشند.

$$D_{ls} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ n_l \cos \theta_l & -n_l \cos \theta_l \end{bmatrix}, \quad D_{lp} = \begin{bmatrix} \cos \theta_l & \cos \theta_l \\ n_l & -n_l \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

$$P_l = \begin{bmatrix} e^{j\phi_l} & 0 \\ 0 & e^{-j\phi_l} \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

حاصل  $D_l P_l D_l^{-1}$  برای هر لایه به صورت زیر خلاصه می‌شود.

$$Q_l = \begin{bmatrix} \cos \theta_l & \frac{j}{\alpha_l} \sin \theta_l \\ j \alpha_l \sin \theta_l & \cos \theta_l \end{bmatrix} \quad (6-2)$$

$\phi_l$  ضخامت موثر فازی لایه  $l$ -ام و برای قطبش  $S$   $\cos \theta_l$  و برای قطبش  $P$  برابر  $\frac{n_l}{\cos \theta_l}$  است [1]. ضرایب بازتاب  $R$  و گذر  $T$ ، که میزان بازتابش و عبور انرژی را بیان میکنند، به صورت زیر محاسبه می‌گردند.

$$R = \left| \frac{M_{21}}{M_{11}} \right|^2$$

$$T = \frac{n_s \cos \theta_s}{n_0 \cos \theta_0} \left| \frac{1}{M_{11}} \right|^2 \quad (7-2)$$

چون درایه‌های  $M_{ij}$  برای دو قطبش  $P$  و  $S$  به طور جداگانه محاسبه میشوند پس چهار ضریب به صورت  $T_s, T_p, R_s$  و  $R_p$  خواهیم داشت [1][4].

## ۲-۲- پرتوشکاف قطبشی

از آنجایی که پرتوشکاف قطبشی نوعی ساختار نوری چند لایه می‌باشد، روابط فوق بر آن حاکم است. در این وسایل سعی میشود که قطبش در عبور و یا در بازتابش در نظر گرفته شود. به عنوان مثال قطبش در بازتابش آن است که یکی از ضرایب بازتاب  $P$  یا  $S$  حداکثر و دیگری حداقل شود. معیار کیفیت یک پرتوشکاف قطبشی، درجه قطبش

فیلترها می‌تواند جداسازی اطلاعات موجود روی دو قطبش متعامد  $p$  و  $s$  که همزمان روی تار نوری ارسال میشوند، باشد.

## ۲- اصول و مبانی فیلترهای نوری چندلایه و آگوریتم ژنتیک

### ۲-۱- نظریه لایه‌های نازک

در برخورد به مرز بین هر دو ماده نامتجانس، مقداری از نور تابیده شده بازتابش کرده و بقیه نور از مرز عبور می‌کند، ضرایب فرنتل<sup>۱</sup> میزان بازتابش و عبور میدان را از مرز مشخص میکنند.

اکنون اگر چند لایه نازک بر روی هم قرار گیرند، هر مرز مقداری از نور تابیده شده را عبور داده و بقیه را منعکس میکند. امواج بازتابی (یا عبوری) میتوانند در ناحیه تابش (یا زیرلایه) با هم تداخل کنند. اگر این تداخل از نوع سازنده باشد، بازتابش (یا عبور) وجود داشته وگرنه سیستم در آن طول موج، بازتابشی (یا عبوری) نخواهد داشت. از طرفی در تابش عمود بر مرز تفاوتی بین دو قطبش  $p$  و  $s$  وجود ندارد. اگر تابش به صورت مایل باشد، به علت تغییر ضخامت فازی لایه‌ها بر اثر تغییر ضریب شکست مواد، رفتار سیستم در مقابل دو قطبش نور متفاوت است. ضخامت فازی هر لایه از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} nd \cos \theta \quad (1-2)$$

در رابطه بالا  $\lambda$  طول موج تابش،  $\theta$  زاویه پرتو نسبت به محور عمود در داخل لایه،  $d$  ضخامت فیزیکی و  $n$  ضریب شکست لایه هستند. در یک سیستم چند لایه میتوان رابطه بین دامنه میدانها را در نواحی تابش و زیرلایه به صورت روابط ۲-۲ و ۳-۲ نوشت [1].

$$\begin{bmatrix} A_0 \\ B_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A'_s \\ B'_s \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = D_0^{-1} \left[ \prod_{l=1}^N D_l P_l D_l^{-1} \right] D_s \quad (3-2)$$

که  $A_0$  دامنه میدان تابش،  $B_0$  دامنه میدان بازتابش،  $A'_s$

۱- Fresnel - ۲ Reflectance - ۳ Transmittance

آن است [2].

$$P_r = \left| \frac{R_s - R_p}{R_s + R_p} \right| \quad \text{یا} \quad P_t = \left| \frac{T_s - T_p}{T_s + T_p} \right| \quad (8-2)$$

برای طراحی این وسایل تاکنون روشهای گوناگونی ارائه شده‌اند. یک روش طراحی، استفاده از لایه‌ها و یا پشته‌های ربع طول موجی<sup>۱</sup> است [2][3]. روش دیگر استفاده از ارضاء شرط بروستر<sup>۲</sup> بین لایه‌ها با استفاده از زاویه تابش است [2]. در این گونه روشها معمولاً از دو ماده با ضرایب شکست بالا ( $n_H$ ) و پایین ( $n_L$ ) استفاده میکنند که  $n_L < n_s < n_H$  است ( $n_s$  ضریب شکست زیرلایه است). روشهای دیگر، روشهای بهینه‌سازی مانند روش سوزنی و آلوگوریتم ژنتیک هستند که در این پژوهش، آلوگوریتم ژنتیک برای طراحی پرتوشکافهای قطبشی انتخاب شده است [5][6][7].

### ۲-۳- آلوگوریتم ژنتیک

آلوگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی پیشامدی<sup>۳</sup> است که با به کارگیری قانونی به نام انتخاب طبیعی<sup>۴</sup>، به یافتن نقطه بهینه جهانی<sup>۵</sup> در فضای جستجو می‌پردازد. نخستین بار انتخاب طبیعی توسط داروین مطرح شد. این قانون بیانگر این است که طبیعت تنها به موجودات سازگارتر و نیرومندتر امکان ادامه زندگی را می‌دهد. این روش به وسیله هالند<sup>۶</sup> در سال ۱۹۷۵ برای شبیه‌سازی قابلیت انعطاف و سازگاری موجودات زنده، با یک برنامه رایانه‌ای پیاده‌سازی شد [7] و بعدها توسط پژوهشگران دیگری مانند گولدبرگ<sup>۷</sup> بهبود یافت [8].

در آلوگوریتم ژنتیک هر نقطه از فضای جستجو به شکل یک رشته به نام کروموزوم نمایش داده میشود که به واحدهای تشکیل دهنده آن ژن میگویند. آلوگوریتم ژنتیک به جای نقطه‌ها با این رشته‌ها کار میکند، در آن تابعی به نام تابع برازندگی<sup>۸</sup> تعریف میشود و برای هر رشته مقدار آن محاسبه میگردد. آلوگوریتم یادشده را میتوان در گامهای زیر خلاصه کرد.

- ۱) ایجاد نسل اول به گونه پیشامدی با توزیع یکنواخت،
- ۲) محاسبه تابع برازندگی برای تک تک رشته‌های این نسل،
- ۳) مقایسه مقدار تابع برازندگی نیرومندترین رشته با مقدار

مشخص (اگر اندازه تابع برازندگی از این مقدار بیشتر باشد، پرش به گام ۷ خواهد بود.)، ۴) اعمال انتخاب طبیعی (ورود رشته‌هایی از نسل پیشین به نسل بعدی که تابع برازندگی آنها از میانگین توابع برازندگی در نسل پیشین بیشتر بوده است) و بازآورش (گزینش پیشامدی تعدادی از رشته‌های نسل پیشین و انتقال آنها به نسل بعدی متناسب با تابع برازندگی آنها)، ۵) به کارگیری عملگرهای دورگه‌سازی<sup>۹</sup> و جهش<sup>۱۰</sup>، ۶) ورود نیرومندترین رشته نسل پیشین به نسل کنونی و پرش به گام دوم، ۷) پایان آلوگوریتم.

### ۳- طراحی پرتوشکاف قطبشی با آلوگوریتم ژنتیک و ویژگیهای نرم‌افزار نوشته شده برای آن

همواره طراحی یک سیستم نوری چندلایه با مشخصات دلخواه به مسأله بهینه‌سازی می‌انجامد و همان طور که گفته شد آلوگوریتم ژنتیک ابزاری قدرتمند برای حل چنین مسائلی است [9][10]. در این گونه مسائل متغیرها، تعداد لایه‌ها، ضخامت و ضریب شکست هر لایه هستند که برای رسیدن به پاسخ مطلوب باید بهینه‌سازی شوند.

در این پروژه، در مورد پرتوشکافهای قطبشی، تابع برازندگی ( $FF$ ) عکس قدر مطلق خطا و به صورت زیر تعریف شد.

$$FF = \frac{1}{\sum_{ii} (|R_s - I| + |R_p|)} \quad (1-3)$$

با نزدیک شدن مقادیر  $R_p$  به صفر و  $R_s$  به یک، به نقطه بهینه جهانی نزدیکتر میشویم یعنی خطا کاهش یافته و تابع برازندگی افزایش می‌یابد. پارامترهای مورد نیاز زاویه تابش، طول موج مرکزی، پهنای باند لازم، تعداد و ضرایب شکست مواد اپتیکی و حداکثر تعداد لایه‌های موردنظر و نیز ضرایب شکست محیط‌های تابش و زیرلایه هستند.

۱- Quarter Wave Stack - ۲ Brewster

۳- Stochastic - ۴ Natural Selection

۵- Global - ۶ Holland - ۷ Goldberg

۸- Fitness Function - ۹ Crossover

۱۰- Mutation

برای طراحی یک فیلتر  $n$  لایه، باید  $n$  متغیر تعیین گردد که  $n$  متغیر پیوسته ( ضخامت لایه‌ها ) و  $n$  متغیر گسسته ( ضریب شکست لایه‌ها ) هستند. تابع برازندگی کاملاً غیرخطی و فضای جستجو بسیار گسترده، چند بعدی و پیچیده می‌باشد. جهش و دورگه‌سازی متناسب با جمعیت انجام میشود. زمان طراحی فیلترهای نوری به کمک الگوریتم ژنتیک به عواملی مانند جمعیت در هر نسل، تعداد نقاط محاسبه طول موج ( $\lambda_i$ ) برای به دست آوردن عرض باند لازم و حداکثر تعداد لایه‌های مورد نظر وابسته است.

نرم‌افزار نوشته شده توانایی طراحی هر نوع فیلتر نوری و با هر تعداد از مواد با ضرایب شکست مختلف را دارد و به زبان ++C و به صورت شیئی‌گرا<sup>۱</sup> نوشته شده است. در ابتدای این برنامه پارامترهای طراحی ( همانطور که در بالا گفته شد ) از کاربر دریافت میشود. سپس برنامه با تولید نسل اول به صورت پیشامدی، با استفاده از تابع برازندگی تعریف شده در بخش ۳ و پیگیری الگوریتمی مشابه آنچه در بخش ۲-۳ آمده است، طراحی را انجام میدهد. حاصل طراحی دو بردار می‌باشد که یکی از آنها مربوط به ضرایب شکست لایه‌ها است و دیگری ضخامت لایه‌ها را بر حسب ضریبی از طول موج مرکزی بیان می‌کند. به کمک مقادیر به دست آمده از طراحی، منحنیهای ضرایب گذر و بازتاب بر حسب طول موج و یا زاویه تابش قابل رسم هستند. این برنامه در حال حاضر قادر به طراحی فیلترهای نوری ( از قبیل فیلترهای ضدبازتاب، بازتابنده و انواع فیلترهای نوارگذر و لبه‌ای ) و از جمله پرتوشکافهای قطبشی با استفاده از ۱۶ ماده و با ۲۵۶ لایه است. با تغییر تابع برازندگی میتوان شیب نواحی با بازتابش بالا و پایین را هم در محاسبات منظور کرد.

#### ۴- نتایج

در این بخش نتایج حاصل از طراحی پرتوشکافهای قطبشی با استفاده از الگوریتم ژنتیک آمده است. شکل ۱ رفتار یک پرتوشکاف قطبشی مکعبی طراحی شده با الگوریتم ژنتیک را نشان میدهد. پرتوشکاف موردنظر دارای ۱۴ لایه شامل ۳ ماده با ضرایب شکست

$n_1 = 1/36 (MgF_2)$ ،  $n_2 = 1/65 (CeF_3)$  و  $n_3 = 2/25 (ZnS)$  می‌باشد. زاویه تابش در داخل منشور نسبت به محور عمود بر قاعده برابر ۴۵ درجه، طول موج مرکزی ۱/۵۵ میکرومتر و پهنای باند در طراحی ۱۶۰ نانومتر در نظر گرفته شده‌اند. تابع برازندگی برای ۱۵۰۰۰ نسل برابر ۹/۱۹۶ میباشد. ضخامت لایه‌ها ضرایبی بین ۰ و ۵/۵ از طول موج مرکزی هستند. ضریب شکست منشور ۱/۵۲ در نظر گرفته شده است. طراحی به کمک رایانه‌ای با پردازشگر 486DX4 انجام شده و زمان صرف شده برای هر نسل ۰/۳۸ ثانیه بوده است. ساختمان این فیلتر به صورت زیر است که در آن  $n_i$  ضریب شکست لایه و ضریب آن، نسبت ضخامت لایه به طول موج مرکزی تابش است.

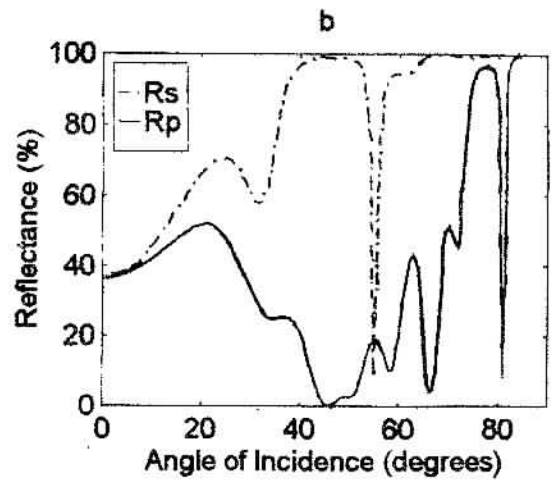
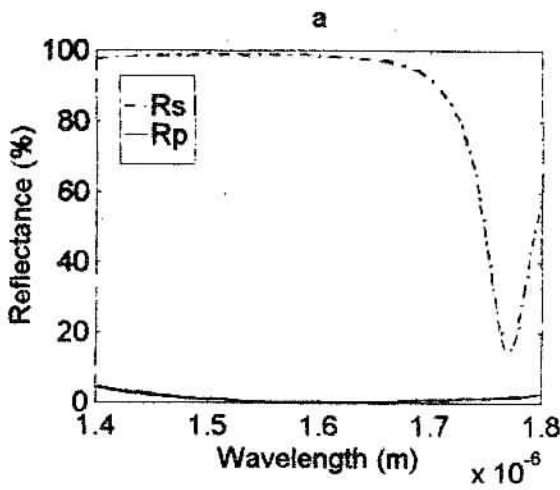
$$\text{Glass} | 0.218n_2, 0.249n_1, 0.232n_2, \\ 0.245n_1, 0.218n_2, 0.368n_1, 0.115n_3, \\ 0.186n_1, 0.206n_2, 0.183n_1, 0.391n_3, \\ 0.250n_1, 0.239n_2, 0.111n_1 | \text{Glass}$$

این نوع پرتوشکاف قطبشی اغلب در مواقعی که به پهنای نوار و محدوده زاویه‌ای نسبتاً وسیع نیاز باشد، به کار می‌روند.

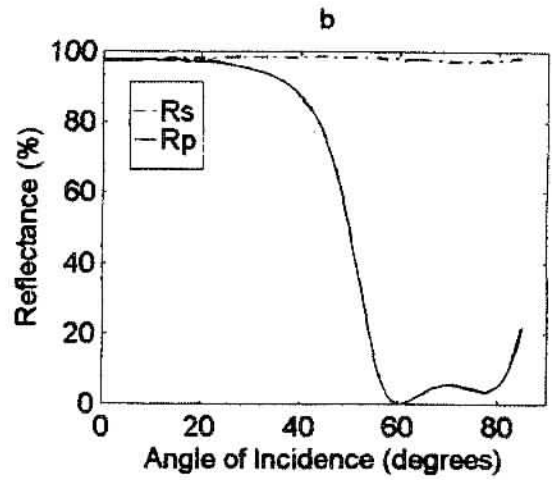
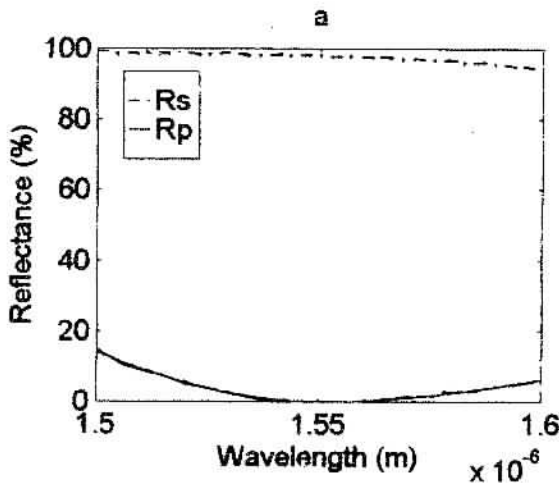
شکل ۲ رفتار پرتوشکاف قطبشی مسطح طراحی شده با الگوریتم ژنتیک را نشان میدهد. این پرتوشکاف دارای ۱۳ لایه شامل ۳ ماده با ضرایب شکست  $n_1 = 1/36$ ،  $n_2 = 1/65$  و  $n_3 = 2/25$  می‌باشد. زاویه تابش نسبت به محور عمود بر مرز برابر ۶۰ درجه، طول موج مرکزی ۱/۵۵ میکرومتر، عرض باند در طراحی ۳۰ نانومتر و ضریب شکست زیر لایه ۱/۵۲ در نظر گرفته شده‌اند. تابع برازندگی برای ۳۲۱۰۰ نسل برابر ۱۲/۱۵ میباشد. زمان محاسبه برای هر نسل ۰/۲۲ ثانیه بوده و ساختمان این فیلتر به صورت زیر است.

$$\text{Air} | 0.061n_1, 0.114n_2, 0.195n_1, \\ 0.108n_2, 0.169n_1, 0.095n_2, 0.188n_1, \\ 0.081n_2, 0.213n_1, 0.082n_2, 0.096n_2, \\ 0.198n_1, 0.040n_2 | \text{Glass}$$

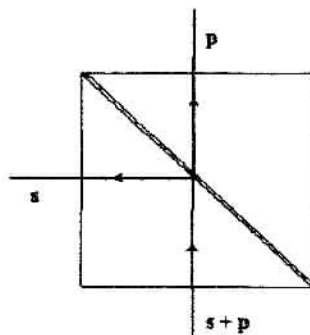
این نوع پرتوشکاف‌ها معمولاً برای عرض نوارهای بسیار



شکل ۱: رفتار پرتوشکاف قطبشی مکعبی طراحی شده با الگوریتم ژنتیک بر حسب طول موج (a) و زاویه تابش (در طول موج مرکزی) (b).



شکل ۲: رفتار پرتوشکاف قطبشی مسطح طراحی شده با الگوریتم ژنتیک بر حسب طول موج (a) و زاویه تابش (در طول موج مرکزی) (b).



شکل ۳: ساختمان پرتوشکاف قطبشی مکعبی

- Media, John Wiley & Sons, 1988.
- [2] H. A. Macleod, *Thin Film Optical Filters*, Adam Hilger, 1986.
- [3] A. Thelen, *Design of Optical Interference Coatings*, McGraw-Hill, 1989.
- [4] S. A. Furman and A. V. Tikhonravov, *Basics of Optics of Multilayer Systems*, Editions Frontieres, 1992.
- [5] L. Li and A. Dobrowolski, "Visible broadband, wide-angle, thin film multilayer polarizing beam splitter," *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 13, pp. 2221-2225, 1 May 1996.
- [6] P. Baumeister, "Rudiments of the design of an immersed polarizing beam divider with a narrow spectral bandwidth and enhanced angular acceptance," *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 16, pp. 3610-3613, 1 June 1997.
- [7] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Univ. Michigan, 1975.
- [8] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
- [9] D. Weile and E. Michielssen, "Genetic algorithm optimization applied to electromagnetics: A review," *IEEE Trans. Ant. Propag.*, vol. 45, no. 3, pp. 343-353, March 1997.
- [10] R. L. Haupt, "An introduction to genetic algorithms for electromagnetics," *IEEE Ant. Propag. Mag.*, vol. 37, no. 2, pp. 7-15, April 1995.

کوچک طراحی میشود و مناسب کارهای تک طول موجی و توان بالا است. شکل ۳ ساختمان پرتوشکاف قطبشی مکعبی را نشان می دهد.

برای بررسی عملی این روش طراحی، پرتوشکافهای مسطح و مکعبی برای طول موج  $632/8$  نانومتر (لیزر هلیوم - نئون) طراحی گردیده و توسط روش تیخیر حرارتی، لایه‌نشانی شده‌اند. سپس این نمونه‌ها به وسیله آزمایشهای نوری (با قطبندهای چرخان) آزمایش گردیده‌اند. با چرخش قطبنده در مسیر نور موازی شده لیزر که به پرتوشکاف تابیده میشود، شدت نورهای بازتابی و عبوری از پرتوشکاف تغییر میکند که این مقادیر قابل اندازه‌گیری می باشند. همچنین از دستگاه اسپکتروفوتومتر برای بررسی مشخصات طیفی این فیلترها استفاده شده است. نتایج به دست آمده، با توجه به خطاهای سیستماتیک موجود، از هماهنگی خوبی نسبت به مقادیر نظری برخوردار بوده‌اند. به عنوان مثال درجه قطبش برای نمونه‌ای از پرتوشکافهای مسطح به  $90\%$  هم رسیده است.

#### ۵- نتیجه گیری

همان طور که از نتایج بر می آید، الگوریتم ژنتیک وسیله‌ای بسیار مناسب و قدرتمند برای طراحی پرتوشکافهای قطبشی و حتی سایر فیلترهای نوری چندلایه است. انعطاف‌پذیری این الگوریتم به حدی است که میتوان گفت حتی تنها با تغییر تابع برازندگی، طراحی تمامی فیلترهای نوری میسر است. کار بعدی در زمینه ساخت پرتوشکافهای قطبشی در طول موج های مخابرات نوری و بهبود نرم افزار برای طراحی انواع فیلترهای نوری خواهد بود. لازم به ذکر است این پروژه در آزمایشگاه تحقیقاتی میکروالکترونیک دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است. در اینجا لازم است از همکارانمان در آزمایشگاه تحقیقاتی میکروالکترونیک بخصوص آقایان مهدی باقری محقق، جلال صبری و محمد نقوی تشکر و قدردانی نمایم.

مراجع

- [1] P. Yeh, *Optical Waves in Layered*