

طراحی حسگر زیستی نوری تشدید مد هدایت شده با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات

حامد حسین‌زاده بحرینی¹ و مهرداد شکوه صارمی²

¹گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، hamed_hosseinzadeh75@yahoo.com

²گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، m_saremi@um.ac.ir

چکیده - حسگرهای زیستی نوری مبتنی بر تشدید مد هدایت شده از جمله حساس‌ترین حسگرهای زیستی معرفی شده به بازار حساب می‌آیند. طراحی چنین حسگرهایی با حساسیت مطلوب فرآیندی پیچیده و زمان‌بر است. در این مقاله ابتدا پارامترهای ساختاری و فاکتورهای حساسیت یک حسگر نمونه معرفی شده و پس از آن بکمک الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات، طراحی یک حسگر تشدید مد هدایت شده با پاسخ بهینه ارائه می‌شود. در پایان نتایج به دست آمده از این روش با نتایج ساختار پیشنهادی در سایر مراجع مقایسه می‌شود.

کلیدواژه- الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات، تحلیل مدی مبتنی بر نظریه خطوط انتقال، توری پراش، حسگر زیستی تشدید مد هدایت شده.

Design of guided-mode resonance optical biosensors using particle swarm optimization algorithm

Hamed Hosseinzadeh Bahreyni¹ and Mehrdad Shokooh-Saremi²

¹Department of Electrical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran,
hamed_hosseinzadeh75@yahoo.com

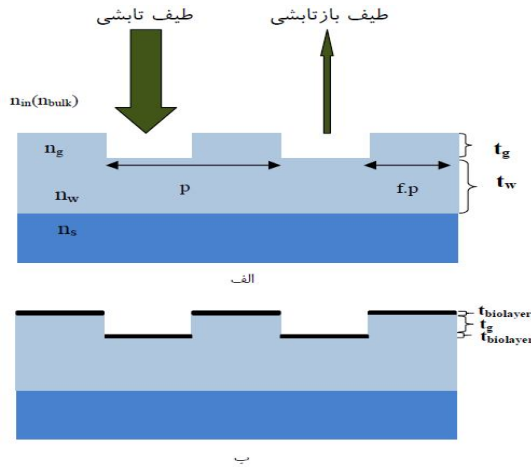
²Department of Electrical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran,
m_saremi@um.ac.ir

Abstract- Guided-mode resonance (GMR) biosensors are one of the most sensitive biosensors on the market. Design of such biosensors is a very complex and time-consuming process. In this paper, first, the main opto-structural parameters of an exemplar GMR biosensor are introduced and then, a GMR biosensor with optimal response is designed using particle swarm optimization (PSO) method. Also, the obtained design results are compared with the ones reported in the literature before.

Keywords: Particle swarm optimization, Diffraction grating, guided-mode resonance biosensor.

1- مقدمه

چهار لایه تبدیل شده است. پارامترهایی که معمولاً در طراحی این حسگر استفاده می‌شوند عبارتند از: دوره تناوب توری، ضخامت لایه توری، ضخامت لایه موجبر و ضریب پرتدادگی.



شکل 1. حسگر تشدید مد هدایت شده (الف) بدون لایه زیستی (ب) با لایه زیستی.

معمولاً جهت ارزیابی عملکرد حسگر، چند فاکتور کلیدی در نظر گرفته می‌شود که مهمترین آن نسبت حساسیت سطحی به حساسیت حجمی⁵ می‌باشد. حساسیت سطحی را نسبت جایجایی طول موج تشدید به ضخامت لایه زیستی تعریف [2] و با رابطه (1) بیان می‌کنند.

$$S_{surface} = \frac{\Delta\lambda}{\Delta t} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{t_{biolayer}} \quad (1)$$

λ_1 طول موج تشدید در حالت پایه (بدون لایه مولکول زیستی) و λ_2 طول موج تشدید پس از قرار گرفتن لایه زیستی است. $t_{biolayer}$ ضخامت لایه زیستی می‌باشد. حساسیت حجمی، حساسیت حسگر به تغییر ضریب شکست پس زمینه⁶ یا همان محیط آزمایش است که با رابطه (2) بیان می‌شود [2].

$$S_{bulk} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{n_{2bulk} - n_{1bulk}} \quad (2)$$

n_{1bulk} ضریب شکست محیط آزمایش در حالت اولیه و n_{2bulk} ضریب شکست محیط آزمایش پس از تغییر ضریب شکست آن است. تغییر ضریب شکست محیط آزمایش می‌تواند ناشی از تغییر درجه حرارت باشد که عاملی

حسگرهای زیستی یک گروه از سیستم‌های اندازه‌گیری می‌باشند که طراحی آن‌ها بر مبنای شناسایی انتخابی آنالیت‌ها¹ (نمونه مورد سنجش) براساس اجزاء بیولوژیک و آشکارسازهای فیزیکی و شیمیایی صورت می‌پذیرد. در حسگرهای زیستی نوری از ویژگی‌های مختلف نوری برای شناسایی آنالیت مورد نظر استفاده می‌شود.

توری پراش یکی از ساختارهای متناوب نوری است که کاربردهای بسیاری در زمینه ساخت ابزارهای نوری دارد. یکی از پدیده‌هایی که ممکن است در اثر تابش نور به توری پراش به وجود آید، پدیده تشدید مدهای هدایتی است. هرگاه بین ثابت انتشار موج تابشی و ثابت انتشار مدهای نشتی² موجبر توری تطبیق برقرار شود، تزویج اتفاق می‌افتد و مدهای نشتی تحریک می‌شوند [1]. این پدیده به صورت تغییرات ناگهانی در دامنه میدان‌های عبوری و بازتابشی ظاهر می‌شود. به طول موج‌های مدهای موجبر، طول موج تشدید گفته می‌شود. پهنای خط و مکان طول موج تشدید به وسیله پارامترهای فیزیکی ساختار تعیین می‌شوند. طول موج تشدید حساسیت زیادی به تغییرات ضریب شکست مواد اطراف ساختار دارد، بنابراین این ساختار می‌تواند به عنوان یک حسگر زیستی که تغییرات در ضریب شکست ناشی از واکنش‌های بیومولکولی را تشخیص می‌دهد، استفاده شود. حسگر زیستی تشدید مد هدایت شده دارای وضوح تشخیص بالایی است و همچنین نیاز به استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری پیچیده ندارد. شکل 1 نمایی از یک پیکربندی رایج حسگر تشدید مد هدایت شده را نشان می‌دهد. شکل 1- الف حسگر بدون لایه زیستی را نشان می‌دهد که از دو لایه تشکیل شده است. لایه اول یک توری پراش با دوره تناوب p ³، ضریب پرتدادگی f ⁴، ضخامت t_g و ضریب شکست n_g می‌باشد. لایه دوم، لایه موجبر به ضخامت t_w و ضریب شکست n_w است. هر دو لایه توری و موجبر بر روی یک زیرلایه با ضریب شکست n_s قرار گرفته‌اند. در شکل 1- ب، این پیکربندی را به همراه لایه زیستی مشاهده می‌کنیم که به یک ساختار

¹Analyte

²Leaky modes

³Period

⁴Filling factor

⁵Surface/Bulk sensitivity ratio

⁶Background

ارزیابی عددی کیفیت ذرات، یک تابع شایستگی¹⁰ تعریف می‌شود و برای هر ذره براساس پارامترهای بهینه‌سازی آن محاسبه می‌شود. این الگوریتم توسط موقعیت‌یابی تصادفی ذرات در حال حرکت با سرعت تصادفی شروع می‌شود. سرعت، نرخ تغییر مکان یک ذره است و به شکل تابع شایستگی برای همه ذرات در جمعیت اولیه محاسبه می‌شود و موقعیت تصادفی اولیه هر ذره به عنوان بهترین موقعیت قبلی ذره¹¹ تعیین می‌شود که به شکل موقعیت قبلی ذره در جمعیت¹² به عنوان بهترین موقعیت جمعیت (G) نگه داشته می‌شود. تغییر موقعیت ذره می‌تواند در چرخه (k+1) به صورت زیر بیان شود:

$$V_m^{k+1} = \omega V_m^k + c_1 \text{rand}_1() (P_m - X_m^k) + c_2 \text{rand}_2() (G - X_m^k) \quad (4)$$

$$X_m^{k+1} = X_m^k + V_m^{k+1} \Delta t \quad (5)$$

که ω ضریب وزنی اینرسی¹³ (تمایل ذره به حفظ حالت قبلی) و c_1 و c_2 به ترتیب نرخ‌های شناختی¹⁴ و اجتماعی¹⁵ نامیده می‌شوند. $\text{rand}_1()$ و $\text{rand}_2()$ دو عدد تصادفی توزیع شده یکنواخت بین صفر و یک هستند. معادله (4) نشان می‌دهد که سرعت جدید ذره، حافظه‌ای از سرعت قبلی، بهترین موقعیت خودش و بهترین موقعیت جمعیت را دارد. پس موقعیت هر ذره بر اساس معادله (5) با زمان به روز می‌شود، به طوری که Δt پله زمانی (معمولاً $\Delta t=1$) است. همچنین P_m و G براساس قانون زیر به روز می‌شوند:

قانون به روز رسانی P_m : اگر $FF(X_m^{k+1})$ بزرگ‌تر از $FF(P_m)$ باشد، پس $P_m = (X_m^{k+1})$.

قانون به روز رسانی G : اگر $FF(\text{best } P_m)$ بزرگ‌تر از $FF(G)$ باشد، پس $G = \text{best } P_m$.

مخرب برای حساسیت حسگر محسوب می‌شود. لذا حساسیت حسگر به آن باید حداقل مقدار ممکن باشد. فاکتور دوم ضریب شایستگی حساسیت سطحی⁷ است که نسبت حساسیت سطحی به پهنای باند نیم توان می‌باشد و با رابطه (3) بیان می‌شود.

$$FOM_{\text{surface}} = \frac{S_{\text{surface}}}{FWHM} \quad (3)$$

در این رابطه هرچه حساسیت سطحی بیشتر و پهنای باند نیم توان کمتر باشد، توانایی تشخیص لایه‌های نازک بیشتر می‌شود. پس با توجه به فاکتورهای ذکر شده، هدف در این مقاله یافتن ساختاری است که دارای بیشترین مقدار حساسیت سطحی و کمترین مقادیر حساسیت حجمی و پهنای باند نیم توان باشد.

2- الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات

بهینه‌سازی انبوه ذرات از رفتار گروهی پرندگان، ماهی‌ها، زنبور عسل و مانند آنها ایده می‌گیرد. بهینه‌سازی انبوه ذرات یک ابزار بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت است که برای حل مسائل بهینه‌سازی می‌تواند به سادگی پیاده‌سازی و استفاده شود. به عنوان یک الگوریتم، قدرت اصلی این روش سرعت نسبتاً بالای همگرایی و سادگی پیاده‌سازی آن در مقایسه با بسیاری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی از جمله الگوریتم ژنتیک است. این الگوریتم توسط کندی⁸ و ابرهات⁹ در سال 1995 ارائه شده است [3].

در روش بهینه‌سازی انبوه ذرات استاندارد [4] هر ذره از جمعیت به عنوان یک نقطه در یک فضای جستجوی N بعدی در نظر گرفته می‌شود که تغییر مکان (حرکت) خود را براساس تجربه خود و تجربه سایر ذرات تنظیم می‌کند. هر ذره توسط یک بردار N پارامتری به شکل $X_m = \{x_{1m}, x_{2m}, \dots, x_{Nm}\}$ ، $1 \leq m \leq N_{POP}$ نشان داده می‌شود. m یک عدد صحیح است و اشاره به موقعیت ذره در جمعیت دارد (که این جمعیت N_{POP} ذره را شامل می‌شود) و N نیز تعداد پارامترهای طراحی می‌باشد که یک فضای جستجوی N بعدی را تشکیل می‌دهند. برای

¹⁰ Fitness function (FF)

¹¹ Best previous particle position (P_{best})

¹² Position of the best particle in the swarm (G_{best})

¹³ Inertia weight

¹⁴ Cognitive

¹⁵ Social

⁷ Figure Of Merit for the surface sensitivities (FOM_{surface})

⁸ Kennedy

⁹ Eberhart

جدول 2. بازه تغییرات پارامترهای طراحی در مرحله اول.

مشخصات طراحی	نماد	فضای جستجو
ضخامت لایه توری	t_g	5 تا 500 نانومتر
ضخامت لایه موجبر	t_w	100 تا 500 نانومتر
ضریب پرتدادگی	f_{factor}	0,1 تا 0,5
بازه طول موج	$[\lambda_1 \lambda_2]$	[600-700]
دقت اندازه‌گیری		0,1 نانومتر

جدول 3. نتایج مرحله اول بهینه‌سازی.

نتایج طراحی	مقدار بدست آمده با الگوریتم	توضیحات
ضخامت لایه توری	126,7 نانومتر	
ضخامت لایه موجبر	178,9 نانومتر	
ضریب پرتدادگی	0,138	
نسبت حساسیت سطحی به حجمی	8,56	$S_{surface} = 0,394$ $S_{bulk} = 0,046 \mu\text{m}/\text{RIU}$
ضریب شایستگی سطحی	1,01	$\text{FWHM} = 0,39 \text{ nm}$

جدول 4. پارامترهای طراحی در مرحله دوم.

مشخصات طراحی	نماد	فضای جستجو
ضخامت لایه توری	t_g	5 تا 130 نانومتر
ضخامت لایه موجبر	t_w	179 نانومتر
ضریب پرتدادگی	f_{factor}	0,1 تا 0,3
بازه طول موج	$[\lambda_1 \lambda_2]$	[690-705]
دقت اندازه‌گیری		0,01 نانومتر

شکل 2، طیف بازتابی، حساسیت سطحی و حساسیت حجمی حسگر طراحی شده را نشان می‌دهد.

این چرخه‌ها توسط برگشت به محاسبه روابط 4 و 5 ادامه می‌یابد، تا به یک جواب بهینه همگرا شود یا بیشینه مقدار چرخه فرا برسد.

3- طراحی حسگر زیستی تشدید مد هدایت

شده با استفاده از الگوریتم PSO

در این طراحی تعداد ذرات 20، C_1 و C_2 برابر 1,49، و ω به صورت خطی از 0,7 تا 0,4 کاهش می‌یابد. مشخصات پیکربندی مورد طراحی در جدول 1 نشان داده شده است. پارامترهای طراحی ضخامت لایه توری، ضخامت لایه موجبر و ضریب پرتدادگی می‌باشند. بهینه‌سازی در دو مرحله انجام می‌شود، به تابع شایستگی مرحله اول در رابطه 6 و تابع شایستگی مرحله دوم در رابطه 7 اشاره شده است.

$$FF_1 = \frac{S_{surface} - S_{bulk}}{S_{surface} + S_{bulk}} + S_{surface} \quad (6)$$

$$FF_2 = \frac{S_{surface} - \text{FWHM}}{S_{surface} + \text{FWHM}} + S_{surface} \quad (7)$$

جدول 1. مشخصات پیکربندی مورد طراحی.

ردیف	پارامتر	مقدار
1	دوره تناوب	450 نانومتر
2	ضریب شکست محیط تابش	1
3	ضریب شکست خروجی (زیرلایه)	1,44
4	ضریب شکست توری	1,97
5	ضریب شکست موجبر	1,97
6	ضخامت لایه زیستی	10 نانومتر
7	ضریب شکست لایه زیستی	1,5

به پارامترهای طراحی و نتایج مرحله اول در جدولهای 2 و 3 اشاره شده است. همچنین پارامترهای طراحی در مرحله دوم در جدول 4 و نتایج این مرحله در جدول 5 نشان داده شده‌اند.

جدول 6. مقایسه نتایج حساسیت روش پیشنهادی با مرجع [5].

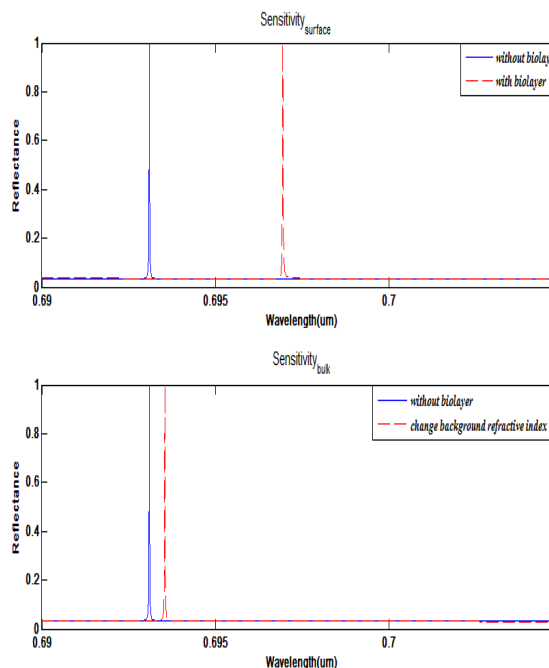
فاکتور حساسیت حسگر	ساختار طراحی شده با الگوریتم PSO	ساختار پیشنهادی در مرجع [5]
نسبت حساسیت سطحی به حجمی	8,72	4,27
الگوی شایستگی حساسیت سطحی	$25,6 \text{ (RIU)}^{-1}$	$1,1 \text{ (RIU)}^{-1}$
حساسیت سطحی	0,384	0,385
حساسیت حجمی	$0,44 \mu\text{m/RIU}$	$0,09 \mu\text{m/RIU}$
پهنای باند نیم توان	0,015 نانومتر	0,35 نانومتر

جدول 5. نتایج مرحله دوم بهینه‌سازی.

نتایج طراحی	مقدار بدست آمده با الگوریتم	توضیحات
ضخامت لایه توری	12,84 نانومتر	
ضخامت لایه موجبر	179 نانومتر	
ضریب پخشندگی	0,103	
نسبت حساسیت سطحی به حجمی	8,72	$S_{\text{surface}}=0,38$ $S_{\text{bulk}}=0,044 \text{ m/RIU}$
ضریب شایستگی سطحی	25,6	FWHM= 0,15 nm

مراجع

- [1] Jacobs S.F., *How diffraction grating works*, Technical Report, The University of Arizona, 1996.
- [2] Wang Q., Zhang D., Yang H., Tao C., and Huang Y., *Sensitivity of a label free guided mode resonant optical biosensor with different modes*, *Sensors*, vol.12, pp.9791-9799, 2012.
- [3] Eberhart R. and Kennedy J., *A new optimizer using particle swarm theory*, *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, pp. 39-43, 1995.
- [4] Shokooh-Saremi M. and Magnusson R., *Particle swarm optimization and its application to the design of diffraction grating filters*, *Opt. Lett.*, vol. 32, no. 8, pp.894-896, 2007.
- [5] Jao C.S. and Lin H.Y., *Ultrasensitive guided-mode resonance biosensors superimposed with vertical-sidewall roughness*, *Appl. Opt.*, vol. 50, pp. 5139-5148, September 2011.



شکل 2. طیف بازتابی حسگر زیستی طراحی شده.

۴- نتیجه‌گیری

در جدول 6، نتایج حساسیت حسگر پیشنهادی در مرجع [5] با حسگر طراحی شده در این مقاله مقایسه شده است. همان‌طور که در جدول 6 مشاهده می‌شود، طراحی با استفاده از روش پیشنهادی در این گزارش می‌تواند روند پیچیده طراحی یک حسگر را ساده‌تر کند. همچنین حسگر طراحی شده حساسیت بیشتری نسبت به نمونه‌های پیشنهادی در سایر مقالات دارد.