Reconfigurable Planar Metasurface Lens using TiO2: Design and Simulation

Mahdieh Bozorgi^{*}, Mahmood Rafaei-Booket

Faculty of electrical and computer engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mails: Bozorgi@znu.ac.ir, Booket@znu.ac.ir

*Corresponding author

Short Abstract

A reconfigurable plasmonic metasurface lens using TiO_2 thin film is designed and simulated. Such a planar lens consists of an array with gold nanoantennas mounted on an uniaxial anisotropic substrate. The element of this array is a class of V-shaped nano-antenna with two freedom degrees for extracting phase diagram needed for plasmonic lens design. Two different parameters of this element are the length V arms and its angle. The used Titanium dioxide (TiO_2) as a substrate of this metasurface leads to adding another freedom degree into the unit cell due to its anisotropy property at optical regime. Such a unit cell is analyzed using Method of Moments (MoM) in which its dyadic Green's function is evaluated by means of the Equivalent Transmission Line Model (ETLM). Using MoM/ETLM, the cross-polar phase diagram of unit cell is extracted once the optical axis of anisotropic thin film is aligned in *x*-direction. Then, the elements' dimensions of the lens's array is selected by means of the obtained phase diagram and the equal optical length principle to fulfill the required phase discontinuities of each cell and produce double focus points. Finally, the entire of structure is simulated using a Finite Element Method (FEM) based simulator. It is numerically shown that a double focus planar lens is achieved once lens surface is achieved by changing the incident polarization.

Keywords

Anisotropic substrate, Plasmonic Metasurface, Method of Moments (MoM), Reconfigurable optical lens.

1- Short Introduction (4-5 lines)

Nano-antenna gratings on anisotropic thin films are analyzed by authors in [1, 2] and it has been shown that changing the anisotropy degree of anisotropic thin films used in these periodic structures leads to tunability in their reflection characteristics. In the literature, the frequency behavior of planar optical lens composed of plasmonic metasurfaces can be engineered by changing the shape of used nano-antennas [3] and the type of used thin films are not main role in the design of such lenses. However, it is desired to investigate the effects of thin films on performance of such structures. Since the natural anisotropic materials in optical frequencies have prominent anisotropy properties unlike microwave frequencies, utilizing such materials in the plasmonic lens design can demonstrate interesting and flexible behaviors.

2- Proposed Work and Methodology (including comprision, simulation/experimental results and discusion)

Since changing the optic axis direction of uniaxial anisotropic medium can change its permittivity tensor, using anisotropic material as a substrate of plasmonic lens leads to reconfigurable structure. In this work, a quasi-periodic array composed of V-shaped nano-antennas mounted on Titanium dioxide (TiO_2) thin film as an anisotropic substrate is proposed as a reconfigurable plasmonic lens. It is shown the proposed planar structure is a double-focus lens and its intensity of focuses points is varied by changing the optic axis direction of anisotropic thin film without changing the dimensions of nano-antennas.

3- Conclusion (4-5 lines)

A reconfigurable plasmonic metasurface lens on TiO_2 was proposed. Analysis of its unit cell was carried out using MoM/ETLM described in [2], to facilitate the analysis of anisotropic medium. Using this technique, the phase and amplitude diagrams of cross-polarized component of the scattered field was calculated. By this information, the appropriate V-shaped elements were selected for designing a planar plasmonic lens with focal spots in its front and back sides. The focusing intensity distribution of the cross-polarized scattered wave from the designed lens with iso/-anisotropic thin films was calculated for various incident light polarization angle with respect to the optic axis direction in the transverse plane. Due to anisotropy property of TiO_2 , it was shown that the focusing intensities in focal spots can be tuned by the optic axis direction rotation without changing the nano-antennas' dimensions. In addition, the focal distances, numerical aperture (NA), full width at half maximum (FWHM) and the depth of focuses (DOFs) were examined. It is concluded that using TiO2 thin film would increase the design flexibility of double-focus lens.

4- References (2-3 references)

[1] M. Bozorgi, Z. Atlasbaf, "Spectral soulution for scattering analysis of periodic plasmonic nano-antennas on iso/anisotropic substrate," IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol. 34, no. 11, pp. 2624-2630, Jun. 2016.

[2] M. Rafaei-Booket, M. Bozorgi, "Dyadic Green's function of plasmonic nano-antenna gratings on natural/artificial anisotropic thin films," Journal of Applied Physics, vol. 129, no. 22, pp. 223105, 2021.

[3] M. K. Chen, Y. Wu, L. Feng, Q. Fan, M. Lu, T. Xu, D. P. Tsai, "Principles, functions and applications of optical metalens," Adv. Opt. meter., vol. 9, no. 4, pp. 2001414 (1-23), 2021.

لنز فراسطح پلاسمونی مسطح آرایش پذیر با استفاده از ماده ناهمسانگرد TiO2: طراحی و شبیهسازی

مهدیه بزرگی'`، استادیار ؛ محمود رفائی بوکت'، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران - Bozorgi@znu.ac.ir
 ۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران - Booket@znu.ac.ir

چکیدہ

در این مقاله، طراحی و شبیهسازی لنزی تنظیمپذیر با فراسطح پلاسمونی ارائه میشود که روی زیرلایه ناهمسانگرد تک محور چاپ شده است. سلول واحد این ساختار، نانوآنتنی ۷شکل از جنس طلاست که بر روی لایه نازک دیاکسید تیتانیوم (TiO2) قرار میگیرد. نانوآنتن مذکور دارای دو درجه آزادی در استخراج دیاگرام فازی است که یکی از آنها، پارامتر طول بازوی عنصر نانوآنتن و دیگری زاویه بین دو بازوی ۷شکل است. استفاده از زیرلایه TiO2 هم انعطاف بیشتری به سلول واحد اضافه میکند که به تغییر میزان ناهمسانگردی زیرلایه در طول موجهای نوری برمی گردد. به کمک روش ممان، دیاگرامهای دامنه و فاز میدان پراکنده شده با قطبش متعامد از سلول واحد برای حالتی که محور نوری زیرلایه ناهمسانگرد در جهت محور *x* قرار دارد، محاسبه میشود و در طراحی لنز مسطح استفاده میشوند. با استفاده از دیاگرام فازی حاصل و اصل طول نوری یکسان، نانوآنتنهای خاصی در سطح لنز چیده میشود و در طراحی لنز مسطح استفاده میشوند. با استفاده از دیاگرام فازی حاصل و اصل طول نوری یکسان، نانوآنتنهای خاصی در سطح لنز چیده میشوند تا جابجایی فاز لازم را برای ایجاد نقاط متمرکزکننده نور در کانونهای لنز تامین کنند. در مرحله پایانی، لنز طراحی شده، شبیه سازی میشود و نشان داده میشود که در اثر تابش موج صفحه ای به سطح لنز، دو نقطه کانونی برای تمرکز نور در قسمتهای جلوئی و پشتی آن حاصل میشود که با تغییر زاویه بین محور نوری زیرلایه ناهمسانگرد و جهت میدان الکتریکی موج تابشی، شدت نور در کانونها تنظیم میشود. چنین رفتاری با چرخش محور نوری زیرلایه ناهمسانگرد و خهت میدان الکتریکی موج تابشی، شدت نور در کانونها

كلمات كليدى

زيرلايه ناهمسانگرد، فراسطح پلاسموني، روش ممان، لنز پلاسموني تنظيمپذير.

نام نویسنده مسئول: دکتر مهدیه بزرگی ایمیل نویسنده مسئول: bozorgi@znu.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۱۸ تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۰۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۲۶

۱– مقدمه

طراحی لنزهای نوری به دلیل این که پرتوهای نور مسیرهای مختلف و فازهای متفاوتی تجربه می کنند، مبتنی بر اصل جبرانسازی مناسب فاز است. در محدودههای طول موجی فروسرخ نزدیک و فروسرخ میانی ساختار لنز با استفاده از مواد شفاف با ساختار هندسی مناسب طراحی و ساخته شده است اما این لنزها برای استفاده در مدارهای مجتمع نوری مناسب نیستند [۱]. برای حل این مشکل، ساختار فراسطح نازک با قابلیت لنزی در طول موجهای نوری پیشنهاد شده است [۲–۷]. این ساختار مسطح لنزی متشکل از عناصری با ابعاد زیر طول موج است که روی زیرلایهای عایق قرار گرفته است که فراسطح هم گفته می شود [۸]. به گونهای تغییر کند که موج عبوری/بازتابی به جبهه موج مطلوبی برسد. بر این اساس هر نانوعنصر استفاده شده در فراسطح باید تغییر فاز بر این اساس هر نانوعنصر استفاده شده در فراسطح باید تغییر فاز

ابعاد آنها امکانپذیر است [۱، ۲]. بدیهی است که تغییر گذردهی الکتریکی زیرلایه، نیز میتواند سبب تغییر پاسخ فاز سلول واحد سازنده این ساختارها بشود که اخیرا در [۹] بررسی شده است. در لنزهای فراسطح پلاسمونی معمولی، برای تغییر فواصل کانونی و یا تنظیم شدت تمرکز نور در کانونها لازم است که کل ساختار دوباره بازطراحی شود که خود این فرآیند، هزینهبر و وقتگیر است. بنابراین اخیرا برای کنترل-پذیر بودن مشخصات تشعشعی لنزهای فراسطحی از گرافین بایاس شده در عناصر سازنده آنها استفاده شده است [۱۰] و یا در [۱۱] با استفاده از عناصر حساس به حرارت، لنزی آرایش پذیر گزارش شده است. مشخص است که هزینه پیادهسازی این نوع لنزها به دلیل اینکه تجهیزات جانبی دیگری هم لازم دارند، زیاد است. بهجای مهندسی عناصر پلاسمونی، میتوان از زیرلایههای ناهمسانگرد استفاده کرد که تغییر زاویه بین محور میتوان از زیرلایههای ناهمسانگرد استفاده کرد که تغییر زاویه بین محور موری آنها و جهت میدان الکتریکی موج تابشی سبب تغییر تنسور گذردهی الکتریکی آنها میشود [۱۲]. بنابراین استفاده از زیرلایه

ناهمسانگرد و کنترل دیاگرام فازی فراسطح می تواند سبب تنظیم شدت نور در کانونهای لنز شود. از آنجا که تحلیل و طراحی لنزهای مسطح پلاسمونی مشابه ساختارهای آرایههای بازتابی [۱۳] و آرایههای انتقالی [۱۴] مبتنی بر محاسبه پاسخ فاز سلولهای واحد آنها است، پرواضح است که این پاسخ فاز تحت تاثیر ضخامت و مشخصه عایق و نیز شکل نانوآنتنهاست. بنابراین بررسی نحوه کنترل پاسخ فاز با استفاده از لایه ناهمسان گرد و تغییر زاویه قطبش نور ورودی حائز اهمیت است. چنین خاصیتی میتواند با قرار دادن ساختارهای نانوآنتنهای پلاسمونی روی زيرلايه ناهمسان گرد و تغيير زاويه بين محور نوري و جهت ميدان الکتریکی ورودی در این ساختار انجام شود. آرایش پذیری در چنین ساختاری که با تغییر قطبش موج تابشی و در حالت کلی زاویه بین محور نوری و جهت میدان الکتریکی تابشی انجام می گیرد، نسبت به تنظیمپذیری شدت نور با تغییر مقدار بایاس گرافین در [۱۰] و یا تغییر حرارت در [۱۱] با سهولت بیشتری همراه است و نیاز به تجهیزات جانبی دیگری برای تغییر بایاس یا دما ندارد. روشن است که برای تحلیل سریع و دقيق سلول واحد اين ساختار نياز به روشي است تا بتوان اطلاعات موج پراکنده شده از آن را محاسبه کرد.

در این مقاله، ابتدا یک روش محاسباتی برای تحلیل سلول نانوآنتن با زیرلایه ناهمسانگرد و شرایط مرزی متناوب ارائه می شود. در این روش تابع گرین دایادی به کمک مدل خط انتقال معادل در حوزه فوریه استخراج می شود [۹]. تابع حاصل در معادله انتگرالی که برای محاسبه چگالیهای جریان سطحی موثر نانوآنتن تشکیل شده است، به کار گرفته می شود. برای حل این معادله انتگرالی، روش ممان گالرکین [۱۲] استفاده می شود. با استفاده از این روش، اطلاعات میدان پراکنده شده (مولفه قطبش متعامد) بر حسب طول بازوهای نانوآنتن Vشکل و زاویه آن محاسبه می شود. سپس، با استفاده از این اطلاعات، نانوآنتن های Vشکل مناسبی انتخاب می شود تا نمایه فاز مطلوب لنز را ایجاد کنند، این نمایه فاز به کمک اصل طول نوری یکسان^۲ به دست میآید [۱۵]. در این کار، لنز مسطح حاصل با زیرلایه ناهمسان گرد تکمحوری (TiO2)، قابلیت تمرکز موج پراکنده شده را در دو نقطه کانونی در جلو و پشت فراسطح دارد. برای نشان دادن این رفتار لنزی، ساختار فراسطح $\mathrm{HFSS}^{\mathrm{T}}$ مراحی شده، تحت تحریک موج تخت قرار گرفته و در نرم افزار شبیهسازی می شود. نتایج حاصل شده، نشان می دهد که برخلاف مواد همسان گرد، استفاده از مواد ناهمسان گرد باعث می شود که شدت تمرکز کانونها برای نور ورودی با قطبشهای TE و TM متفاوت باشد. همچنین نشان داده شده است که با تغییر جهت محور نوری ماده ناهمسانگرد نسبت به جهت میدان الکتریکی موج تابشی، شدت تمرکز میدان در نقطه کانونی جلو نسبت به شدت تمرکز میدان در نقطه کانونی پشتی تغيير مي كند.

۲- روش تحلیل سلول واحد طرحی از لنز فراسطح پلاسمونی مسطح و نمونهای از سلول سازنده آن با

¹ Anisotropic thin film

۲-۱- فرمولبندی مساله

در روش تحلیل که هسته اصلی آن استخراج تابع گرین دایادی بر مبنای مدل خط انتقال معادل است [۹]، باید سلول واحد فراسطح به سه لایه موازی مختلف مطابق شکل ۲ تقسیم شود. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، بالاترین لایه و پایینترین لایه با فضای آزاد اشغال شده و لایه میانی از ماده ناهمسانگرد (TiO2) ساخته شده است. همچنین، جریان سطحی موثر بر روی نانوآنتن های پلاسمونی با نماد برداری J نمایش داده شده است. روش تحلیل چنین ساختارهای متناوبی در [۹] بطور کامل توضیح داده شده است و در اینجا فقط گام-های اصلی آن برای روشن شدن و تکمیل شدن بحث آورده می شود.



شکل ۲- تقسیم بندی سلول واحد به لایههای موازی که در مدل خط انتقال معادل لازم است.

در گام اول تحلیل، لازم است که رابطهای بین میدان الکتریکی پراکنده شونده و جریان سطحی موثر القایی روی نانوآنتنهای طلایی برقرار شود. بر این اساس، رابطه مذکور میتواند بصورت زیر در مرز z=d (محل قرارگیری نانوآنتنها) نوشته شود:

$$\mathbf{E}_{tan}^{scat} + \mathbf{E}_{tan}^{exc} = -Z_{eq}\mathbf{J} \tag{1}$$

^r Equal optical length principle

^{*} High Frequency Structure Simulator

$$Z_{eq} = \frac{\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}}{N_r} \tag{(7)}$$

که در آن، $N_r = \varepsilon - j\kappa$ ضریب شکست مختلط [۱۶] است. در اینصورت، ارتباط بین میدان پراکنده شونده از سلول واحد و چگالی جریان سطحی القایی موثر روی نانوآنتن طلایی در حوزه طیف بصورت (۳) نوشته می شود:



شکل ۳- اطلاعات میدان پراکندهشده با قطبش متعامد از عناصر انتخابی با شمارههای ۱تا ۴ و عناصر آینهشده آنها با شمارههای ۵ تا ۸.

 \tilde{J}_{y} و \tilde{J}_{x} ، \tilde{G}_{xy} ، $\tilde{G$

$$[\tilde{G}] = ([\tilde{Y}_u] + [\tilde{Y}_d])^{-1}$$

(۴)

که در آن، $[\tilde{Y}_{a}]$ و $[\tilde{Y}_{a}]$ ماتریسهای ادمیتانسی در حوزه طیف هستند و به ترتیب از مرز z=d مطابق شکل ۲، به طرف بالا و طرف پایین

دیده می شوند که b ضخامت زیرلایه TiO₂ است. با توجه به اینکه فضای آزاد محیطی همسانگرد است، بنابراین ماتریس [$\tilde{Y}_{_{II}}$] را می توان از روشی که در [۱۷] بیان شده است، محاسبه کرد. در حالی که، ماتریس [$\tilde{Y}_{_{II}}$] به کمک مدل خط انتقال و بصورت (۵) تعیین می شود [۹]:

$$[\tilde{Y}_{d}] = \{ [Q_{Aniso}]([I]_{2K \times 2K} - [\Gamma]) \} \\ \times \{ [P_{Aniso}]([I]_{2K \times 2K} + [\Gamma]) \}^{-1}$$
 (δ)

که در آن، $(1+M) \times (1+2) = K = [\Gamma]$ ماتریس ضریب بازتاب در مرز Z = 1 است با فرض اینکه نانوآنتنها حضور ندارند، به صورتیکه در شکل ۲ نشان داده شده است. ابعاد ماتریسهای $[Q_{Aniso}]$ و $[P_{Aniso}]$ و $[P_{Aniso}]$ و $[P_{Aniso}]$ و ممکل ۲ نشان داده شده است. در واقع، هم $X \times X \times 2$ است که مقادیر ثابت آن در [۹] تعیین شده است. در واقع، اثرهای ناهمسانگردی زیرلایه TiO2 در بطن ماتریس $[\tilde{Y}_{d}]$ است که در (۵) گنجانده شده است. نهایتا، چگالی جریانهای سطحی موثر القایی روی نانوآنتن با حل معادله انتگرالی (۳) به کمک روش ممان گالرکین حاصل می شود. در نتیجه، میدان پراکنده شده از سلول واحد از (۱) بدست می آید و مدهای تفرقی مختلف موج انتقالی از رابطه (۶) تعیین می شود:

$$\begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{E}}_{x}^{diff} \\ \tilde{\mathbf{E}}_{y}^{diff} \end{pmatrix} = ([I]_{2K \times 2K} - [R]) \cdot \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{E}}_{x}^{inc} \\ \tilde{\mathbf{E}}_{y}^{inc} \end{pmatrix} + [\tilde{G}]_{2K \times 2K} \cdot \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{J}}_{x_{m,n}} \\ \tilde{\mathbf{J}}_{y_{m,n}} \end{pmatrix} \quad (\mathscr{F})$$

که در آن، "diff" و "inc" به ترتیب میدانهای پراکنده شونده در ناحیه انتقال (z>d) و ناحیه تابش (z<0) اشاره دارد.



شکل ۴– سطح دایرهایشکل در صفحه XX که براساس اصل طول نوری یکسان برای طراحی لنز پلاسمونی در نظر گرفته شده است. لازم است ذکر شود که سطح همفاز کرویشکل به مرکز نقطه کانونی و شعاع معادل آن، برابر با فاصله کانونی *f*است. نقطه A موقعیت سلولی را نشان میدهد که از نقطه وسط لنز فاصله *r* دارد.

همچنین [R] در (۶)، که ماتریس ضریب بازتاب با حضور نانوآنتنها واقع در فصل مشترک فضای آزاد و زیرلایه ناهمسانگرد (z=d) است، بصورت (۲) قابل محاسبه است:

$$[R] = [\tilde{G}] \times ([\tilde{Y}_u] - [\tilde{Y}_d]) \tag{V}$$

۳- طراحی لنز پلاسمونی و نتایج شبیهسازی آن

در این بخش، ابتدا سلول واحد با زیرلایه ناهمسانگرد که در شکل ۱ نشان داده شده است، با روش گفتهشده در بخش قبلی تحلیل میشود و سپس به کمک اطلاعات حاصل، لنز پلاسمونی طراحی شده در نرمافزار HFSS شبیه سازی می شود.

۳-۱- دیاگرام دامنه و فاز قطبش متعامد میدان الکتریکی

پراکندهشده از سلولواحد

در این ساختار، طول موج کاری برای طراحی لنز ۲میکرومتر در نظر گرفته شده است که در محدوده مادون قرمزِ نزدیک بوده و در مخابرات نوری بسیار پرکاربرد است [۱۸]. ابعاد سلول واحد نشان داده شده در شکل ۱، $t_x=t_y=420$ nm طوری انتخاب شده است که از گلبرگ ناخواسته جلوگیری شود. ضخامت زیرلایه ناهمسانگرد تک محوری me250nm است که ضرایب گذردهی الکتریکی نسبی آن روی قطر اصلی تنسور بصورت (5.913, ϵ_{33} =5.913, ϵ_{33}) بوده و ضخامت نانوآنتن-های طلایی matrix است تا تقریب جریان سطحی موثری که در روش تحلیل ذکر شد، کارایی بسیار خوبی داشته باشد [۱۲].

همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود، چهار نوع مختلف از نانوآنتن های V شکل به همراه حالت آینه شده آن ها، دارای دامنه تقریبی واحد و اختلاف فاز $\pi/4$ هستند. ابعاد عناصر انتخاب شده بصورت ,713 L= 713 واحد و اختلاف فاز $\pi/4$ هستند. ابعاد عناصر انتخاب شده بصورت ,213 m شایان ذکر است که در این حالت، جهت محورنوری زیرلایه TiO2 در شهده با قطبش متعامد از عناصر تحت تابش عمودی موج صفحه ای و به محک روش ممان محاسبه می شود که نتایج آن با نتایج حاصل از نرمافزار HFSS هم قابل مقایسه است. کارایی محاسباتی روش ممان در مقایسه با نرمافزار در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل۵- خطای نسبی و زمان محاسباتی موج پراکنده شده بر حسب تعداد هارمونیکهای فضایی M=N. خطاهای نسبی برای سلول واحد با شماره ۴ در

λ₀=۲µm محاسبه شده است.

جدول۱. مقایسه کارایی محاسباتی دو روش (ممان و FEM).							
اشغال حافظه	CPU مصرفی	زمان تحلیل برای هر نمونه	روش تحليل				
7.11	7.18	۵/۸۹ ثانیه	روش ممان [۹]				
7.40	7.۵۵	۱۸۰ ثانیه	HFSS (FEM) [7.]				

دقت شود که هم کد متلب روش ممان و هم نرمافزار HFSS روی رایانه یکسانی اجرا میشوند که مشخصات آن بصورت: -Intel Core i7 معان (میانه یکسانی اجرا میشوند که مشخصات آن بصورت: -A790K CPU (۲۰ ممان 4GHz with 32 GB of RAM است. در روش ممان تعداد هارمونیکهای فضایی در (۳) بصورت *H=N=15* انتخاب شده است که برای محاسبه دیاگرامهای دامنه و فاز سلولواحد استفاده میشود. این انتخاب به دلیل حصول خطای نسبی کمتر از ۰/۱ درصد است که

در شکل۵ قابل مشاهده است.

۲-۲- طراحی لنز پلاسمونی

در طراحی لنز پلاسمونی مسطح، دیاگرام فاز بهدست آمده برای جبران تاخیر فاز جزئی حاصل از اختلاف مسیرهای نقطه تمرکز به عنصر (*I*) که در شکل ۴ نشان داده شده است، استفاده می شود. همان طور که در این شکل می بینیم، *I* اختلاف بین مسیرهای الکتریکی *f* و *I*+*I* است. *I* می تواند ضریبی از طول موج کاری به صورت δ (δ +N)=*I* باشد، که N یک عدد صحیح و δ کسری از طول موج فضای آزاد است. برای دستیابی به فاز ثابت روی سطح کروی به مرکز نقطه کانونی و شعاع *f* برای مولفه متعامد نور تشعشع شده، δ در محل هر نانوآنتن با نانوآنتنی با طول (L) و زاویه (v) مناسب جبران می شود. ناپیوستگی فاز لازم هر عنصر با استفاده ار اصل طول نوری یکسان به دست می آید که در ادامه توضیح داده می شود.

همان طور که در شکل ۴ می بینیم، سلول دلخواه در نقطه A و در فصله r از نقطه مرکز لنز انتخاب شده است تا ناپیوستگی فاز لازم (فاصله r از نقطه مرکز لنز انتخاب شدی آن محاسبه شود. برای این منظور، دو اشعه نوری انتخاب می کنیم که یکی از نقطه مرکزی لنز به نقطه کانونی مقابل در T=Z و دیگری از نقطه A به T=Z می سد. طبق اصل طول نوری یکسان داریم:

$$\varphi_0 - k_0 f = \varphi(r) - k_0 \left(\sqrt{r^2 + f^2} - f \right) - k_0 f$$
(A)

که $otin p_0$ ناپیوستگی فاز سلول مرکزی لنز و k_0 طول موج فضای آزاد است. با سادهسازی رابطه (۸)، ناپیوستگی فاز یک سلول دلخواه قرار گرفته در نقطه A به صورت (۹) به دست میآید:



شکل۶- نمایه فاز لازم برای طراحی لنز دایروی با نانوآنتنهای ۲شکل.



شکل ۷- نتایج شبیهسازی مربوط به نحوه توزیع شدت تمرکز نور، در امتداد خطوط موازی با محور x که شامل نقاط کانونی لنز طراحی شده بر روی زیرلایه ناهمسانگرد تکمحوری است، برحسب مقادیر مختلف زاویه ∅:

$$\phi = 90^{\circ}$$
 ($\phi = 45^{\circ}$ ($\phi = 0^{\circ}$ ($\phi = 0^{\circ}$ ($\phi = 0^{\circ}$

$$\varphi(r) = \varphi_0 + 2n\pi + k_0 \left(\sqrt{r^2 + f^2} - f\right)$$
(9)

ساختار نهایی، لنزی دایروی با قطر ۱۸/۹میکرومتر (و با مساحت ۲۸۰/۵میکرومترمربع) و فاصله کانونی ۵میکرومتر است که در شکل ۶ نمایه فاز محاسبه شده آن مشاهده می شود.



۳-۳- نتایج شبیهسازی لنز پلاسمونی

در این بخش برای صحتسنجی نتایج تحلیلی حاصل، کل ساختار بصورت تمامموج در نرمافزار HFSS شبیهسازی می شود. در این شبیه سازی، شدت تمرکز نور در نقاط کانونی جلویی و پشتی لنز برحسب تغییرات تنسور ضریب گذردهی الکتریکی زیرلایه ناهمسانگرد TiO2 بصورت عددی محاسبه می شود. این تغییرات در \overline{s} زیرلایه با چرخش محورنوری در صفحه XY نسبت به جهت قطبش موج تابشی ایجاد می-شود. در این حالت، تنسور گذردهی الکتریکی زیرلایه ناهمسانگرد، با روابط (۹) و (۱۰) قابل تعیین است:

$$= \varepsilon_{Layer2} = \varepsilon_0 \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & 0 \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}$$
(1.)

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \varepsilon_{11} \cos^2 \phi + \varepsilon_{22} \sin^2 \phi \\ \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{11} \sin^2 \phi + \varepsilon_{22} \cos^2 \phi \\ \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = (\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}) \sin \phi \cos \phi \\ \varepsilon_{zz} = \varepsilon_{33} \end{cases}$$
(11)

که در آن، ϕ زاویه محورنوری در صفحهXY نسبت به جهت میدان الکتریکی موج صفحهای ورودی است که در این شبیهسازی تابش بصورت عمودی و با قطبش TM است. شکل ۷ تغییرات توزیع شدت تمرکز نور را در امتداد خطوط موازی با محور X بر حسب چرخش محورنوری TiO2 نشان میدهد ($\phi \le \phi \ge \phi \ge \phi$). همانطور که در این شكل مشاهده مىشود، شدت تمركز نقطه كانونى جلويي (Z=5µm) و نقطه کانونی پشتی ($Z=-5\mu m$) با افزایش زاویه ϕ بیشتر می شود. این رفتار آرایشپذیر و انعطافپذیر لنز پیشنهادی بر روی محور z هم در شکل ۸ نشان داده شده است. همان گونه که در این شکلها مشاهده می شود، برخلاف لنزهای پلاسمونی با زیر لایه های همسانگرد، استفاده از مواد ناهمسانگرد سبب کنترل پذیرشدن ویژگیهای تشعشعی آنها می-شود بدون اینکه ابعاد نانوآنتنها یا سلول واحد تغییر کند. حالت دیگری از این لنزهای تنظیم پذیر با زیرلایه ناهمسانگرد نیز می تواند با ثابت نگه داشتن محور نوری و تغییر قطبش موج تابشی حاصل شود. برای بررسی تغییرات شدت کانونها در اثر چرخش قطبش، توزیع شدت روی خطوطی موازی با محور x و گذرنده از نقاط کانونی لنز، در شکل P(الف)-(ث) ترسیم شده است. همچنین توزیع شدت روی محور اصلی لنز بر حسب زاویه ¢ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که در این شکلها دیده می شود، شدت تمرکزهای جلو و پشت ساختار نسبت به زاویه تابش ϕ =۴۵ $^{\circ}$ متقارن نیستند که این برخلاف عملکرد لنز با لایه زاویه تابش همسان گرد است. برای اثبات این ادعا، لنز با همان ابعاد و توزیع نانوآنتن -ها، با زیرلایههای همسانگرد هم شبیهسازی شده است که در شکل۱۱ مشاهده می شود.



شکل۱۱- توزیع شدت در راستای محور اصلی (⁽ ⁽ ⁽)) لنز طراحی شده با دو لایه همسانگرد و ضخامتهای الف) ۲۵۰ نانومتر و ب) ۳۰۰ نانومتر. پاسخهای متقارن به قطبشهای ورودی متقارن نسبت به نیمساز عناصر ۷-شکل (⁽45=φ) در هر دو ساختار و با ضخامتهای پ) ۲۵۰ نانومتر و ت) ۳۰۰ نانومتر.



شکل۱۲- پاسخهای نامتقارن به قطبش ورودی متقارن نسبت به نیمساز عناصر V-شکل (°45=¢) در لنز طراحی شده روی لایه ناهمسانگرد 2io2 با ضخامت الف) ۲۵۰، ب) ۳۰۰، پ) ۳۵۰ و ت) ۴۰۰ نانومتر.

برای بررسی بیشتر تاثیرات لایه ناهمسان گرد در عملکرد لنز طراحی شده، شدت دو نقطه کانونی را بر حسب زاویه چرخش (برای چهار ضخامت مختلف لایه ناهمسان گرد ۴۰۰nm و ۳۵۰، ۳۰۰، و ۲۵۰ محاسبه میکنیم. نتایج عددی درشکل ۱۲ نشان داده شده است. وقتی



Z (μ̃m) شکل۱۰- توزیع شدت در راستای محور z لنز طراحی شده روی لایه ناهمسانگرد.

0

5

10

0≝ -10

-5

نور ورودی قطبیده در راستای x است ($\phi^{=,\circ}$)، تحت تاثیر ضریب گذردهی الکتریکی غیرعادی ۲/۱۹۷ $\varepsilon_E = \gamma$ قرار می گیرد.



شکل۱۳– الف) تغییرات فواصل کانونی و NA بر حسب طول موج، ب) شدتهای تمرکز بر حسب طول موج وقتی موج تخت به صورت عمود به لنز می تابد.



⁴ Full Width Half Maximum

⁵ Depth Of Focus

شکل ۱۴- الف) تغییرات FWHM بر حسب طول موج برای هر دو نقطه کانونی در صفحات موازی با صفحه لنز. ب) عمق تمرکز (DOF) روی محور اصلی لنز (z).

در حالی که برخلاف لایه همسان گرد، مولفه متعامد میدان پراکنده شده در جلای که برخلاف لایه، تحت تاثیر مقدار عادی ضریب گذردهی الکتریکی (z = 0) قرار می گیرد. این موضوع برای تابش با قطبش y ($\phi = 0$) برعکس است.

پیچیدگی ساختاری	روش تنظیم پذیری	WHAM	VN	jar k	طول موج	مرجع
چندلایه و نیازیه تجهیزات جانیی (ییچیده)	تغییر یایاس الکتریکی گراقین	៤))/។ µm		۵۰×۵۰ µm²	،۴۰۵ ۶۳۰ ۵۵۰ و ۱۳۳	[1+]
نیازیه تجهیزات جانیی (پیچیدہ)	تغییر دما و قطیش موج تایشی	۲/۱ تا ۲/۷ μm	- /A 69.	شعاع: ۸۴ µm و ضخامت نانوساختار ۳/۲ µm	5 ۳/۸ ۴/۵ μm	[11]
تګلایه و ساده	چرخش محور نوری و یا تغییر قطبش موج تابشی	С 1 1/Д µт	•/۸۲ Մ •/۹۷	شعاع: ۹/۴۵μm و ضخامت نانوآنتن: ۳۰nm	G Т Т/9 µm	این کار

جدول۲. مقایسه ساختار پیشنهادی با لنزهای مسطح تنظیم پذیر جدید

برای مولفههای x و y نور ورودی با سایر مقادیر ϕ نیز توضیح مشابهی صادق است. به همین علت است که نتایج به دست آمده در شکل ۱۲ رفتاری متقارن ندارند. باید توجه داشت که افزایش زاویه قطبش ϕ از $^{\circ}$ به ⁶۵۴ منجر به کاهش شدت تمرکز نقاط کانونی و نهایتاً از بین رفتن آن میشود، در حالی که افزایش این زاویه از ⁶۵۴ به ⁹۰۴ باعث افزایش شدتهای تمرکز میشود.

ما رفتار لنزی این ساختار را در بازه طول موجی (۱/۷۶ تا ۲/۸۶ میکرومتر) نیز بررسی کردیم و در این راستا نمودارهای فاصله کانونی، FWHM^۴ نقاط کانونی و ^۵DOF آنها را در این محدوده بدست آوردهایم. نتایج حاصل، علاوه براینکه عملکرد پهنباند این ساختار را تایید کرده، بلکه نشان داده است که در طول موجهای بیش از ۲میکرومتر، شدت تمرکز نقاط کانونی بهویژه کانون جلو بهبود چشمگیری می یابد. مقدار FWHM نقاط کانونی در صفحه موازی با صفحه لنز بین ۱ تا ۱/۵ میکرومتر است. تغییرات DOF هر دو نقطه کانونی مشابه است. همان طور که در شکل ۱۲(الف) نشان داده شده است در بازه طول موجی (۱/۷۶– میکرومتر کاهش می یابد ۲/۸۶ میکرومتر کاهش می داد در حالی که روزنه عددی (۱۹۳۰) فزایش می یابد (0.97–0.85). در

⁶ Numerical Aperture

[4] Y. Jia, "Focal shift in metasurface based lens," Physics, Optic Express, vol. 26, no. 7, pp. 8001-8015, 2018.

[5] M. K. Chen, Y. Wu, L. Feng, Q. Fan, M. Lu, T. Xu, D. P. Tsai, "Principles, functions and applications of optical metalens," Adv. Opt. meter., vol. 9, no. 4, pp. 2001414 (1-23), 2021.

[6] X. Xiong, et al., "High focusing efficiency terahertz lens based on Huygens metasurface," Physics, Journal of Nanophotonics, Apr. 2021. DoI: 10.1117/1.JNP.15.026011.

[7] K. S. Nielsen, M. Carlsen, S. Reza, "Non-imaging metasurface design for collimated beam shaping," Physics, 2022.

[8] B. Rezaee Rezvan, M. Yazdi, S. E. Hosseininejad, "A 2-bit programmable metasurface for dynamic beam steering applications," Tabriz Journal of Electrical Engineering (TJEE), vol. 51, no. 2, Summer 2021.

[9] M. Rafaei-Booket, M. Bozorgi, "Dyadic Green's function of plasmonic nano-antenna gratings on natural/artificial anisotropic thin films", Journal of Applied Physics, vol. 129, no. 22, pp. 223105, 2021.

[10] S. Park, G. Lee, B. Park, Y. Seo, C. B. Park, Y. T. Chun, C. Joo, J. Rho, J. M. Kim, J. Hone, S. C. Jun, "Electrically focustunable ultrathin lens for high resolution square subpixels," light: Science & application, vol. 9, no. 98, pp. 1-13, 2020.

[11] Y. Song, W. Liu, X. Wang, F. Wang, A. Wei, H. Meng, N. Meng, N. Lin, H. Zhang, "Multifunctional metasurfaces lens with tunable focus based on phase transition material," Front. Phys., vol. 9, 651898(1-11), 2021.

[12] M. Bozorgi, Z. Atlasbaf, "Spectral soulution for scattering analysis of periodic plasmonic nano-antennas on iso/anisotropic substrate", IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol. 34, no. 11, pp. 2624-2630, Jun. 2016.

[13] M. Rafaei-Booket, M. Bozorgi, "Low-cost inhomogeneous material for low-RCS reflectarray antenna implementation", AEU-International Journal of Electronics and Communications, vol. 149, pp. 154182, May 2022.

[14] L.-X. Wu, et al., "Circular-polarization-selective metasurface and its applications to Transmit-Reflect-Array antenna and bidirectional antenna," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022. Dol: 10.1109/TAP.2022.3191213.

[15] J. Lin, and S. Wu, X. Li, C. Huange, X. Luo, "Design and numerical analysis of ultrathin plasmonic lens for subwavelength focusing by phase discontinuities of nanoantenna array", Applied Physics Express, vol. 6, no. 2, pp. 022004(1-3), 2013.

[16] Handbook of Optical Constants of Solids, E. D. Palik, Academic press, New York, 1991.

[17] T. Itoh, "Spectral doamin immitance approach for dispersion characteristics of generalized printed transmission lines", IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, vol. 28, no. 27, pp. 733-736, Jul. 1980.

[18] K. scholle, S. Lamrini, P. Koopmann, P. *Fuhrberg, Frontiers in guided wave optics and optoelectronics*, chapter 21: 2µm laser sources and their possible applications, February 2010.

[۱۹] مهسا علی جباری، ساغر جارچی، حمیده خصوصی ثانی و مسعود عدالتی پور، "شبیه سازی و بهینه سازی نانوآنتن ها با هم بندی چند ضلعی برای سلول های خور شیدی"، فصلنامه نانومقیاس، دوره دوم، شماره دوم، صفحات ۱۰۳–۱۰۹، تابستان ۱۳۹۴.

[۲۰] محمدرضا اسکندری و سید ایوب میرطاووسی، "ارائه یک نانوساختار پلاسمونیک مبتنی بر نانوآنتنهای تنگستن هشت پره برای بهبود طیف جذب در سیستمهای حرارتی خورشیدی"، فصلنامه نانومقیاس، دوره نهم، شماره ۲، صفحات ۱۱۹–۱۲۱، تابستان ۱۴۰۱.

[21] V. C. Su, C. H. Cho, G. Sun, D. P. Tsai, "Advances in optical metasurfaces: fabrication and applications," Opt. Express, vol. 26, no. 10, pp. 13148-13182, 2018.

[22] Y.-Y. Chou, Y.-C. Lee, "A numerical analyses of planar plasmonic focusing lens," Optics Communication, vol. 410, pp. 585-590, Mar. 2018.

این محدوده طول موج، مشاهده می شود که در تابش های موج تخت با طول موجهای بیشتر از ۲میکرومتر، شدت تمرکز نقاط کانونی بهبود می-یابد. همان طور که در شکل ۱۳(ب) می بینیم، ضریب بهبود برای نقطه کانونی عقبی بیشتر از نقطه کانونی جلویی است (در طول موجهای بیشتر از ۲/۱ میکرومتر بیشتر از یک است).

همچنین در شکل ۱۴(الف)، مشاهده می شود که FWHM نقاط کانونی در صفحه موازی با صفحه لنز بین ۱–۱/۵ میکرومتر تغییر می کند. به علاوه، مقادیر DOF لنز برای طول موجهای مختلف محاسبه شده است و در شکل ۱۴(ب)، مشاهده می شود که تغییرات DOF هر دو نقطه کانونی مشابه است. نکته قابل توجه در این گونه لنزها ضخامت بسیار کم، و مقدار روزنه عددی بسیار بزرگ (۱ تا ۱۵میکرومتر) آنهاست. بنابراین این لنز مسطح قابلیت استفاده در سامانه های مجتمع نوری، تمرکزهای قابل تنظیم، بازتاباننده متمرکز کننده، تقسیم کننده توان، و فناوری علامت گذاری لیزری را دارد. در جدول ۳، ساختار پیشنهادی با استفاده از تنظیم پذیری جدید مقایسه شده است. چنین ساختارهایی با استفاده از روش های فوتولیتو گرافی مناسب برای ابعاد نانو قابل ساخت است [۲۲

۴- نتیجهگیری

مجموعهای از نانوآنتنهای ۷شکل بر روی زیرلایه ناهمسانگرد (TiO₂)، نشانده شده است که منجر به طراحی لنز پلاسمونی نازک با قابلیت تنظیم پذیری می شود. برای ارزیابی صحت عملکرد لنز طراحی شده، ساختار با زیرلایههای همسان گرد و ناهمسان گرد را در نرمافزار HFSS شبیهسازی کردیم. نشانداده شد که بر خلاف زیرلایه همسان گرد، استفاده از مواد ناهمسان گرد باعث می شود که شدت تمرکز برای تابش با قطبش TE و TM متفاوت باشد. همچنین پاسخ لنز به تابشهای عمود با زاویههای قطبش متقارن نسبت به نیمساز نانوآنتنهای V شکل، در هر دو کانون عقب و جلو یاسخی نامتقارن است. در حالت کلی، با چرخش زاویه بین محور نوری زیرلایه ناهمسانگرد و جهت میدان الکتریکی نور ورودی، لنزی آرایش پذیر حاصل می شود که با مطالعه پاسخ فرکانسی این ساختار در بازه وسیع طول موج ۱/۷۶ تا ۲/۸۶ میکرومتر، نشان داده شد که افزایش طول موج سبب کاهش طول کانونی و افزایش روزنه عددی می شود. نهایتا، چنین لنز دوکانونی بسیار نازک با روزنه عددی بسیار زیاد در محدوده ۱/۵–۱/۳۷، FWHM، ۰/۹۷ میکرومتر، و DOF حدود ۲/۴-۲/۴، می تواند در مدارات مجتمع نوری و ادوات با قابلیت تمرکز تنظیمیذیر، مفید و قابل استفاده باشد.

مراجع

[1] F. Aieta, P. Genevet, M. A. Kats, N. Yu, R. Blanchard, Z. Gaburro, and F. Capasso, "Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces," Nano Letters, vol. 12, pp. 4932-4936, 2012.

[2] M. Veysi, et al., "Thin anisotropic metasurfaces for simultaneous light focusing and polarization manipulation," J. Opt. Soc. Am. B, vol. 32, pp. 318-323, 2015.

[3] N. Yu, and F. Capasso, "Optical metasurfaces and prospect of their applications including fiber optics," IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol. 33, pp. 2344-2358, 2015.