بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

بررسی اثر تغییر ضخامت و عرض سطح مقطع عناصر آرایه نانو سیم درتغییر فاز میدان انتقالی

امین وحدت اهر و محمد هاشم واجد سمیعی

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده – در این مقاله به بررسی نقش پارامترهای هندسی سطح مقطع (ضخامت و عرض) نانوسیم های فلزی در تغییر فاز میدان منتقل شده در یک توری انتقالی با ساختار تناوبی یک بعدی می‌پردازیم. بررسی با استفاده از روش المان محدود در محدوده فرکانسی ۹۵ تا ۲۱۵ تراهرتز انجام شده است. در انتها با ارائه یک مثال عددی نشان می‌دهیم که با انتخاب مناسب عرض و با تغییر ضخامت نانوسیم ها می توان به یک بازه ۰ تا ۱۱۰ درجه برای فاز میدان عبوری از توری رسید.

کلید واژه- الگوی فاز، پلاسمونیک، توری، نانو سیم.

Effect of changing the thickness and width of a transmission grating in varying the phase of transmitted waves

Amin Vahdat Ahar and Mohammad H. Vadjed Samiei

School of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology

Abstract- In this paper we analyze the effect of changing the geometrical parameters of a transmission grating in changing the phase of the outgoing waves. The numerical study is based on the Finite Element Method (FEM) in frequencies from 95THz to 215 THz. Lastly we show that with a proper selection of the width and changing the thickness of wires we can reach up to 110 degree phase difference between the incoming and transmitted waves.

Keywords: grating, nano wires, phase pattern, plasmonics

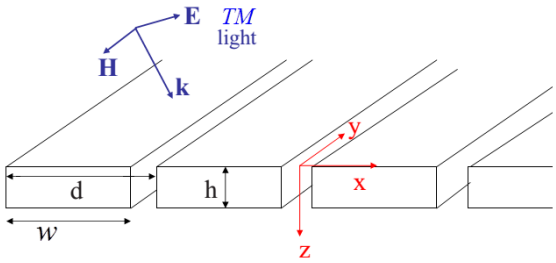
[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

عملکرد کلی بیشتر ادوات نوری را می‌توان بر حسب اصلاح جبهه موج نور بوسیله تغییر فاز یا دامنه یا پلاریزاسیون به شیوه دلخواه توصیف کرد [۱]. انواع اجزاء (component) نوری که فاز موج نوری را تغییر می‌دهند شامل لنز، منشور، صفحات فاز مارپیچی، اکسیکون و به طور عام‌تر مدولاتورهای فضایی فاز (که می‌توانند بسیاری از کارکردهای اجزا نوری اشاره شده را با پاسخ فاز فضاییِ دینامیک و تنظیم پذیر انجام دهند) می‌باشند. نوع دوم اجزا نوری مانند صفحات موج (waveplate) از کریستال‌های دوشکستی حجمی و استفاده از ناهمسانگردی نوری برای تغییر پلاریزاسیون نور استفاده می‌کنند. نوع سوم اجزا نوری مثل توری و هولوگرام بر پایه اپتیک پراشی -دیفرکتیو- است که در اینجا موج‌های پراشیده شده از قسمت‌های مختلف اجزاء نوری در میدان دور با هم تداخل می‌کنند تا الگوی نوری مورد نظر را ایجاد نمایند. تمام این اجزاءِ نوری جبه موج نوری را با استفاده از اثرات انتشاری شکل می‌دهند. تغییر فاز و پلاریزاسیون به صورت تدریجی حین انتشار نور جمع می‌شود. اما می‌توان با ایجاد تغییرات فاز ناگهانی در ابعادی کوچک‌تر از طول موج در مسیر نوری، از اتکاء صرف به اثرات انتشاری دست کشید و به درجات آزادی بیشتری برای تغییر جبهه موج و طراحی نوری رسید. این کار را می‌توان با استفاده از ایجاد یک شیفت فاز بزرگ و کنترل پذیر بین نور تابیده و پراکنده شده در پراکنده‌گرهای تشدیدی نوری که در یک آرایه مناسب جاگذاری شده‌اند انجام داد. اما شرط وجود چنین قابلیتی در یک ساختار تناوبی آن است که هم ضخامت عناصر آرایه و هم دوره‌ی تناوب ساختار هر دو از طول موج کمتر باشند بنابراین ساختار باید یک متاسرفیس باشد [۲].

توری‌های انتقالی فلزی (Transmission Grating) [۳] که با انتخاب صحیح ابعاد سطح مقطعشان می‌توانند در گروه متاسرفیس‌ها قرار گیرند تاکنون غالباً برای ایجاد پلارایزر یا فیلتر طیف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ما در این مقاله نشان می‌دهیم که چنانچه پارامترهای ساختاری به درستی انتخاب شوند، می‌توان فاز موج منتقل شده را به صورت ناگهانی (در فاصله‌ای کمتر از طول موج) تغییر داده و کنترل کرد. امکان تنظیم فاز سبب می‌شود که



شکل ۱: شمای کلی ساختار مورد بررسی. ما پاسخ ساختار را تنها به مود TM بررسی خواهیم کرد.

بتوان از این ساختارها در تحقق موازی سازها و لنزهای تخت نازک (ضخامت کمتر از طول موج) استفاده کرد. ساختار مورد بررسی در شکل یک نشان داده شده است. که در آن h ضخامت سیم‌ها، w عرض سیم و d دوره‌ی تناوب است. در این مقاله خصوصیات پراکندگی ساختار، برای طول موج‌های بزرگتر از ثابت شبکه مورد توجه قرار گرفته است لذا تنها پراش مرتبه‌ی صفر مود منتشر شونده می‌باشد و برای محاسبه ضریب انتقال کلی ساختار نیز تنها به همین مود نیاز داریم. پاشندگی فلز را براساس تابع دی الکتریک درود مدل کرده و از نتایج اندازه گیری استفاده می‌کنیم[۴]. پارامترهای به کار رفته در مدل درود $(\omega_p,\gamma)=(2.176\times10^{15},2.418\times10^{13})[\mathrm{rad/s}]$، (مربوط به طلا) می‌باشند. انتخاب طلا به دلیل خواص پلاسمونی برجسته تر این فلز در بازه فرکانسی مورد استفاده در مقاله می‌باشد. با توجه به ساختار انتخاب شده و فرکانس کاری، مودهای TE در ناحیه‌ی قطع قرار دارند و ضریب انتقال برای آنها نزدیک صفر است از این‌رو در سرتاسر مقاله مودهای TM (میدان مغناطیسی موازی توری) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین ما در شبیه سازی‌ها از روش عددی المان محدود (نرم افزار COMSOL) برای تحلیل ساختارها و بدست آوردن دامنه و فاز میدان انتقالی استفاده کرده‌ایم. در ادامه اثر تغییر ضخامت سیم‌ها را بر فاز موج منتقل شده بررسی خواهیم کرد و سپس به بررسی اثر تغییر عرض سیم می‌پردازیم در نهایت با ارائه یک مثال طراحی نشان می‌دهیم که با انتخاب صحیح مقادیر می‌توان فاز موج منتقل شده را روی یک بازه ۰ تا ۱۱۰ درجه تغییر داد.

۲- بررسی اثر تغییر ضخامت

شکل دو الف و ب به ترتیب دامنه و فاز میدان منتقل شده را روی بازه فرکانسی ۹۵THZ تا ۲۱۵THz نشان می‌دهد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]

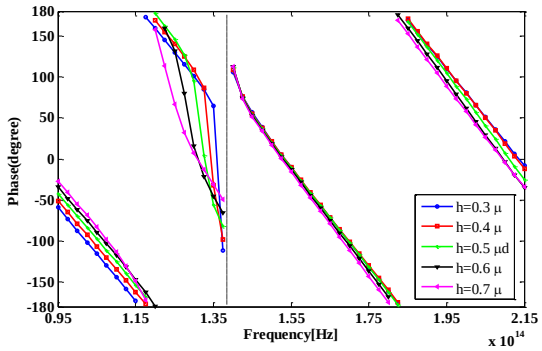
همان طور که مشاهده می‌شود وجود دو رزونانس (یک قله -tip- و یک دره- dip-) در این نمودارها مشهود است. رزونانس اول مربوط به تحریک پلاسمون پلاریتون‌های سطحی حوالی فرکانس ۱۳۹THz می‌باشد. در این رزونانس فاز پراکندگی نیز π رادیان تغییر می‌کند. رزونانس دیگر در طول موج‌های بلندتر مربوط به رزونانس حفره تشدیدی ایجاد شده در شکاف‌ها است. این رفتار رزونانسی را می‌توان با روش شبه تحلیلی بسط مودی توضیح داد. نشان داده شده است که میدان منتقل مرتبه صفر شده از یک توری انتقالی را می‌توان بصورت زیر بدست آورد [۵]:

$$t_0 = \frac{\tau^{12}\exp^{ik_0h}\,\tau^{23}}{1-R^2\exp^{i\phi_T}} \qquad (۱)$$

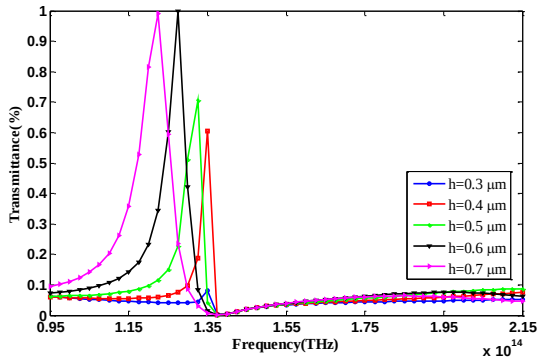
که در آن همان طور که در شکل سه نشان داده شده است (τ^{23}) τ^{12} ضریب انتقال از محیط یک به دو (دو به سه)، $R(=\rho^L=\rho^R)$ ضریب انعکاس، k_0 عدد موج در محیط I و III، $\phi_T = 2\theta + 2k_0h$ و θ فاز پراکندگی ناشی از رزونانس SPP می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود چنانچه $\phi_T = 2m\pi$ باشد مخرج کسر کمینه می‌شود و بنابراین یک تشدید انتظار داریم. در فرکانس‌های بالاتر سهم $2k_0h$ ناچیز است و رزونانس اول حوالی رزونانس SPP اتفاق می‌افتد. وقتی h و طول موج افزایش می‌یابد شرط $\phi_T = 2m\pi$ در طول موج‌های بزرگتر (فرکانس های کمتر از فرکانس رزونانس SPP) برقرار می‌شود. برخی نویسندگان این رزونانس‌ها را تحت عنوان رزونانس پلاسمون سطحی افقی و عمودی می‌شناسند. همان طور که از نمودار مشخص است در نواحی نزدیک رزونانس می‌توان با تغییر ضخامت شیفت فازهای متنوعی ایجاد کرد که از این ویژگی در طراحی انتهای مقاله استفاده کرده‌ایم.

۳- بررسی اثر تغییر عرض

در این قسمت اثر تغییر عرض فلز را بر دامنه و فاز میدان انتقالی بررسی می‌کنیم. در این حالت ضخامت $h = 0.6\mu m$ در نظر گرفته شده است و عرض در بازه‌ی $w = (1,1.3,1.6,1.9)\mu\,\mathrm{m}$ تغییر کرده است. همان طور که در شکل چهار مشهده می‌شود در این حالت نیز می‌توان

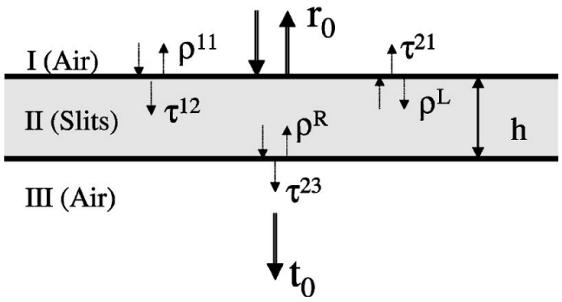


(الف)



(ب)

شکل ۲: نمودار تغییر دامنه و فاز میدان انتقالی بر حسب فرکانس برای مقادیر مختلف h. خط افقی در نمودار الف مربوط به رزونانس SPP می باشد.



شکل ۳: نمودار نشان دهنده ضرایب مختلف پراکندگی در یک توری انتقالی.

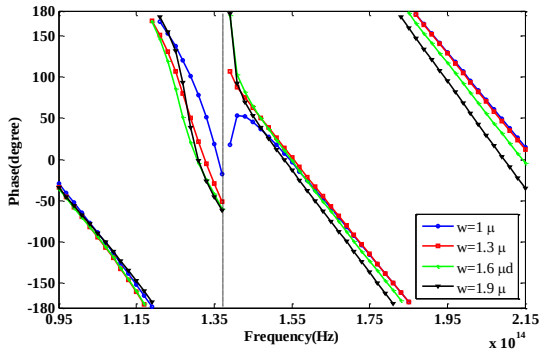
تشدیدهای معرفی شده در قسمت قبل را مشاهده کرد. همین طور فاز میدان منتقل شده در فرکانس‌های نزدیک رزونانس با تغییر عرض تغییر می‌کند.

۴- ارائه یک مثال

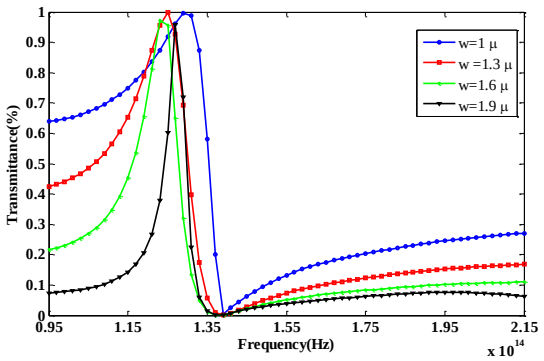
در نهایت نشان می‌دهیم که با انتخاب مناسب پارامترهای هندسی سطح مقطع سیم می‌توان به یک گستره مناسب برای فاز موج منتقل شده رسید. بدین منظور با انتخاب $w = 1.86\mu m$ و تغییر ضخامت برای فرکانس طراحی

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]

$f = 130THz$ شیفت فاز میدان انتقالی را نسبت به میدان تابیده بدست می‌آوریم. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل پنج نشان می‌دهد که فاز نور منتقل شده با تغییر ضخامت از ۰ تا ۱۱۰ درجه تغییر می‌کند. قابلیت تنظیم فاز با تغییر ضخامت امکان طراحی لنزها و موازی سازها را بر پایه این ساختار نشان می‌دهد. به عنوان مثال همان طور که می‌دانیم نور در گذر از یک لنز در هر نقطه اختلاف فاز متفاوتی می‌یابد و این الگوی فازی به گونه‌ای است که نور را در نقطه‌ی کانونی متمرکز می‌کند، با چینش مناسب سیم‌های فلزی با ضخامت‌های گوناگون که همگی ضخامتی بسیار کمتر از طول موج دارند (بر خلاف لنزهای نوری که بسیار حجیم هستند) می‌توان به کارکرد معادل دست یافت.



(الف)

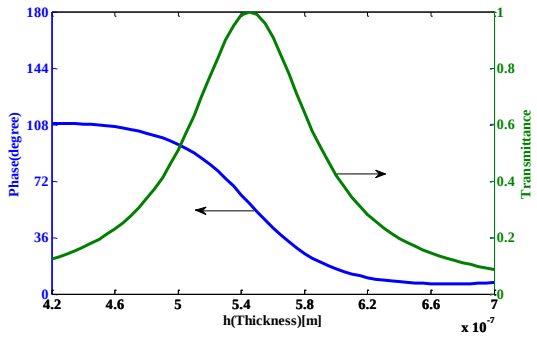


(ب)

شکل ۴: نمودار تغییر دامنه و فاز میدان انتقالی بر حسب تغییر d برای مقادیر مختلف h. خط افقی در نمودار الف مربوط به رزونانس SPP می باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله نقش تغییر پارامترهای هندسی سطح مقطع سیم در یک طوری انتقالی را در تغییر فاز میدان منتقل



شکل ۵: نمدار تغییر دامنه و فاز میدان انتقالی بر حسب تغییر h در عرض $w = 1.86\mu m$ و فرکانس ۱۳۰THz

شده مورد بررسی قرار دادیم و نشان دادیم که با انتخاب مناسب آن‌ها می‌توان یک الگوی فاز مناسب به عنوان مثال همانند الگوی فازی لنز را با این توری انتقالی ایجاد کرد.

مراجع

[1] Yu N., et all., *Flat Optics: Controlling Wavefronts With Optical Antenna Metasurfaces*, p. 44, **IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics**, Vol. 19, No. 3, (2013) 4700423

[2] Kildishev A. V., Boltasseva A., Shalaev V. M., *Planar photonics with metasurfaces*, **Science**, Vol. 339, No. 6125, (2013) 1232009

[3] Porto J. A., Garcıca-Vidal F. J., Pendry J. B., *Transmission Resonances on Metallic Gratings with Very Narrow Slits*, **Phys. Rev. Lett.** 83(14) (1999) 2845-2848

[4] Johnson P. B., Christy R.W., *Optical Constants of the noble Metals*," **Phys. Rev. B**, 6 (1972) 4370-4379

[5] Garcia-Vidal F. J., Martin-Moreno L., Ebbesen T. W., Kuipers L., *Light passing through subwavelength apertures*, **Review of Modern Physics.** 82 (2010) 729-787

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]