



بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و  
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس  
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،  
دانشگاه خوارزمی،  
تهران، ایران.  
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸



## بررسی جفت شدگی مدهای هدایت شده TM در توری های موجبری با پوششی از جنس فراماده

نازنین کاکولکی، عبدالله حسن زاده

گروه فیزیک، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

چکیده- ما انتشار امواج در یک توری موجبری دی الکتریک ساخته شده از پوشش فراماده را مطالعه می کنیم و به کمک تئوری اختلال، عبارتی برای ضریب جفت شدگی عرضی مدهای منتشر شده با قطبش TM درون توری های موجبری مستطیلی ارائه می شود. نمودار ضریب جفت شدگی توری موجبری با پوششی از فراماده را با ضریب جفت شدگی توری موجبری معمولی مقایسه می کنیم سپس ویژگی های خاص این ساختار را گزارش می دهیم. نشان می دهیم که برای چنین ساختاری امکان جفت شدگی برای مد اصلی وجود ندارد و یک مرتبه افزایش در ضریب جفت شدگی چنین ساختاری نسبت به ساختارهای موجبرهای معمولی وجود دارد.

کلید واژه- توری موجبری اپتیکی، ضریب جفت شدگی، فراماده.

## Coupling coefficients of a thin-film waveguide grating based on metamaterial

Nazanin Kakoolaki, Abdollah Hassanzadeh

Department of Physics, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

**Abstract-** We study the propagation of waves in a new dielectric slab waveguide grating with metamaterial cover. Perturbation theory is used to derive an expression that approximates the transverse coupling coefficient for coupling between deferent Transverse Magnetic (TM)-polarized guided modes in a waveguide with a rectangular grating. We numerically obtain the coupling coefficient of waveguide gratings with a double negative cover and compare with that of conventional waveguides, then we report the unusual properties of this structure. We show that the coupling coefficient of the fundamental mode is disappeared. Also the magnitude of the left-handed waveguide gratings enhances more than one order of magnitude.

**Keywords:** Coupling coefficient, Metamaterial, Optical waveguide grating.

## مقدمه

وسلاگو ساختارهای متناوبی با ضریب شکست منفی که به فراماده شهرت پیدا کرده‌اند و دارای ضریب گذردهی الکتریکی منفی و ضریب تراوایی مغناطیسی منفی به صورت هم‌زمان می‌باشند را پیش‌بینی کرد [۱]. پیش‌بینی‌های وی توسط شلبی و همکارانش به صورت تجربی تایید شد [۲] و محققان در پی آن دریافتند که چنین موادی قابلیت و کاربردهای متفاوتی را در ساخت وسایل اپتیکی دارند [۳-۵]. از این رو فراماده، توجه بسیاری از فیزیکدانان را معطوف خود کرد.

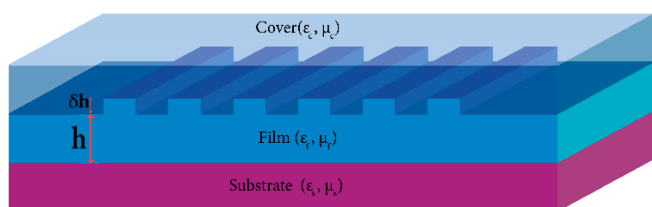
یکی از کاربردهای مورد توجه این مواد، هدایت امواج الکترومغناطیسی در موجبرهایی از این جنس می‌باشد که این مسئله اولین بار توسط راپین در سال ۲۰۰۰ نشان داده شد [۶]. به دنبال او گزارش‌هایی از موجبرهای متقارن و نامتقارن با لایه‌هایی از فراماده ارائه شد که معادله‌ی پاشندگی آن‌ها را مورد بررسی قرار می‌دادند و بعضی از ویژگی‌های جالب و غیرمعمول آن‌ها را گزارش دادند [۷-۸]. توری‌های موجبری ساخته شده از فراماده تاکنون به طور کامل مورد بررسی قرار نگرفتند. از آنجایی که موجبرهای متناوب تحت عنوان توری‌های موجبری دامنه‌ی وسیعی از کاربردهای اپتیکی را به خود اختصاص داده‌اند و نقش پررنگی در اپتیک و فوتونیک دارند [۹-۱۳]، لذا بررسی آن‌ها می‌تواند به نتایج جالبی منجر شود.

در این مقاله ما انتشار امواج با قطبش TM در یک توری موجبری دی‌الکتریک مستطیل شکل با پوشش فراماده را مطالعه می‌کنیم.

## تئوری

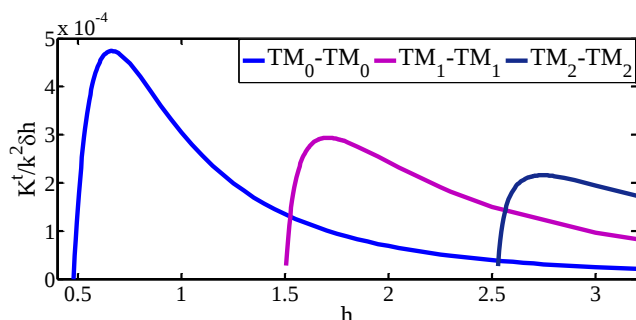
انتشار امواج TM در موجبرهای تخت معمولی به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته است و معادله‌ی پاشندگی، توزیع

میدان‌های الکترومغناطیسی و سایر ویژگی‌های آن با موجبرهای ساخته شده از فراماده مقایسه شده است [۱۴]. ما یک توری موجبری ساخته شده از فراماده را در نظر می‌گیریم و ضریب جفت‌شدگی مدهای آن که پارامتری جهت سنجش اندرکنش مدهای مختلف می‌باشد را بررسی می‌کنیم. برای این کار یک توری موجبری نامتقارن ساخته شده از لایه‌ی فیلمی به ارتفاع  $h$  که با یک لایه‌ی پوششی از جنس فراماده و یک زیرلایه از جنس مواد معمولی احاطه شده است را در نظر می‌گیریم (شکل ۱).



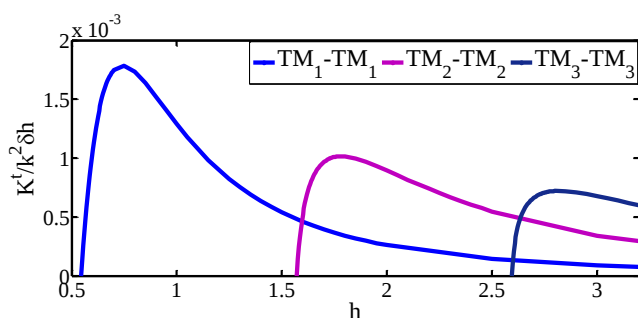
شکل ۱: نمای کلی از توری موجبری مستطیلی.

در نتایج قبلیمان به کمک تئوری اختلال، روابط تعمیم یافته‌ای را برای ضریب جفت‌شدگی مدهای هدایتی TE ارائه داده‌ایم [۱۵]، با تحلیلی مشابه آن ضریب جفت‌شدگی را برای مدهای هدایتی با قطبش TM به دست می‌آوریم و به منظور تاکید بر ویژگی‌های خاص چنین توری‌هایی، آن را با ضریب جفت‌شدگی توری‌های موجبری معمولی ساخته شده از مواد معمولی مقایسه می‌کنیم.



شکل ۲: ضریب جفت‌شدگی عرضی برای توری موجبری ساخته شده از مواد معمولی.

مشاهده می‌کنیم که ضریب جفت‌شدگی عرضی، برای مد اول ( $m=0$ ) بیشترین مقدار را اختیار کرده است. اما با افزایش مرتبه‌ی مدها، ضریب جفت‌شدگی کاهش می‌یابند. حال توری موجبری با پوششی از جنس فراماده را در نظر می‌گیریم و منحنی ضریب جفت‌شدگی عرضی را برای این ساختار رسم می‌کنیم. (شکل ۳)



شکل ۳: ضریب جفت‌شدگی عرضی برای توری موجبری با پوششی از فراماده.

مشاهده می‌شود که ضریب جفت‌شدگی توری موجبری با پوشش فراماده، حدوداً یک مرتبه افزایش می‌یابد. این در حالی است که ضریب جفت‌شدگی برای مد اصلی موجبر حذف می‌شود لذا این یکی از ویژگی‌های خاص توری‌های موجبری با پوشش فراماده محسوب می‌شود. در این ساختار

$$\begin{aligned} \frac{K_{\ell v 1}^t}{k^2 \delta h} = & \frac{c^2 \varepsilon_c^2 \lambda}{2 \pi^2 N_\ell N_v} \left[ (\mu_f - \mu_c) + \frac{N_\ell N_v}{c^2 \varepsilon_c^2} (\varepsilon_f - \varepsilon_c) \right] \times \\ & \frac{\sqrt{n_f^2 k^2 - N_\ell^2 k^2}}{\sqrt{h/\varepsilon_f + \frac{1}{\varepsilon_c \sqrt{N_\ell^2 k^2 - n_c^2 k^2}} + \frac{1}{\varepsilon_s \sqrt{N_\ell^2 k^2 - n_s^2 k^2}}}} \times \\ & \frac{\sqrt{n_f^2 k^2 - N_v^2 k^2}}{\sqrt{h/\varepsilon_f + \frac{1}{\varepsilon_c \sqrt{N_v^2 k^2 - n_c^2 k^2}} + \frac{1}{\varepsilon_s \sqrt{N_v^2 k^2 - n_s^2 k^2}}}} \times \\ & \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_c^2 (n_f^2 k^2 - N_\ell^2 k^2) + \varepsilon_f^2 (N_\ell^2 k^2 - n_c^2 k^2)}} \times \\ & \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_c^2 (n_f^2 k^2 - N_v^2 k^2) + \varepsilon_f^2 (N_v^2 k^2 - n_c^2 k^2)}} \end{aligned} \quad (1)$$

رابطه‌ی (۱) ضریب جفت‌شدگی عرضی برای مدهای هدایتی با قطبش TM را که به کمک تئوری اختلال به دست آمده نشان می‌دهد.

در رابطه‌ی بالا  $c$  سرعت نور در خلا،  $N$  ضریب شکست موثر،  $k$  ثابت انتشار در خلا،  $N_\ell$  و  $N_v$  به ترتیب ضریب شکست موثر  $\ell$ مین و  $v$ مین مد،  $h$  ضخامت فیلم،  $\delta h$  ارتفاع دندانه‌های متناوب توری،  $\lambda$  طول موج،  $\mu_c, \mu_s, \mu_f$  و  $\varepsilon_c, \varepsilon_s, \varepsilon_f$  و  $n_c, n_s, n_f$  به ترتیب ضریب گذردهی الکتریکی، ضریب تراوایی مغناطیسی و ضریب شکست لایه‌ی فیلم، زیرلایه و پوشش می‌باشند. به منظور مقایسه‌ی ضریب جفت‌شدگی عرضی توری موجبری با پوشش فراماده با ضریب جفت‌شدگی توری موجبری با پوشش معمولی، ضریب جفت‌شدگی هر دو نوع موجبر را بر حسب ضخامت لایه‌ی فیلم توری موجبری رسم می‌کنیم.

شکل ۲ منحنی ضریب جفت‌شدگی عرضی را برای سه مد هدایتی اول توری موجبری مستطیلی با مشخصات معلوم [۱۶]، بر حسب ضخامت فیلم موجبری نشان می‌دهد.

material slab waveguides", Opt. Soc. Am. B, vol. 23, pp. 1757-1760, 2006.

- [9] D. T. H. Tan, K. Ikeda, R. E. Saperstein, B. Slutsky, and Y. Fainman, "Chip-scale dispersion engineering using chirped vertical gratings", Opt. Lett. Vol. 33, No. 24, pp. 3013-3015, 2009.
- [10] S. Lavdas, S. Zhao, J. B. Driscoll, R. R. Grote, R. M. Osgood, and N. C. Panoiu, "Wavelength conversion and parametric amplification of optical pulses via quasi-phase-matched four-wave mixing in long-period Bragg silicon waveguides", Opt. Lett. Vol. 39, pp. 4017-4020, 2014.
- [11] A. N. Chrysis, S. M. Lee, S. B. Lee, S. S. Saini, and M. Dagenais, "High sensitivity evanescent field fiber Bragg grating sensor", IEEE Photon. Tech. Lett. Vol. 17, pp. 1253-1255, 2005.
- [12] M. Okuda and K. Kubo, "Analysis of the distributed Bragg-reflector laser of asymmetrical geometry", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 14, No. 6, pp. 855-860, 1975.
- [13] H. Kogelnik and C. V. Shank, "Coupled-wave theory of distributed feedback lasers", Appl. Phys. Vol. 43, pp. 2327-2335, 1972.
- [14] Ch. L. Chen, Foundations for Guided-Wave Optics, p. 33, Wiley-Interscience, Hoboken, New Jersey, 2007.
- [15] N. Kakoolaki, A. Hassanzadeh, "Enhanced coupling coefficients of a thin-film waveguide grating with a double negative cover", Opt. Soc. Am. B, vol. 36, pp. 2564-2570, 2019.
- [16] R. V. Schmidt, D. C. Flanders, C. V. Shank, and R. D. Standley, "Narrow-band grating filters for thin-film optical waveguides", Appl. Phys. Lett., Vol. 25, No. 11, pp. 651-652, 1974.

نیز، با افزایش مرتبه‌ی مدها، ضریب جفت‌شدگی کاهش می‌یابد.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله ما یک توری موجبری مستطیلی با لایه‌ی پوششی از فراماده را در نظر گرفته و ضریب جفت‌شدگی عرضی مدهای هدایت شده با قطبش TM را محاسبه کردیم و نشان دادیم که در مقایسه با منحنی رسم شده ضریب جفت‌شدگی عرضی برای امواج هدایتی TM در توری‌های موجبری معمولی، حدود یک مرتبه افزایش می‌یابد. مشاهده شد که ضریب جفت‌شدگی برای مد اصلی موجبر حذف می‌شود زیرا این موجبر توانایی هدایت چنین مدی را ندارد. همچنین با افزایش شماره مد هدایت یافته، ضریب جفت‌شدگی نیز کاهش می‌یابد.

## مرجع‌ها

- [1] V. G. Vesalago "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ", Sov. Phys. Usp. Vol. 10, No. 4, pp. 509-514, 1968.
- [2] R. A. Shelby, D. R. Smith and S. Schultz, "Experimental verification of negative index of refraction", Science, Vol. 292, pp. 77-79, 2001.
- [3] Y. Dong and T. Itoh, "Metamaterial-based antennas", P IEEE, vol. 100, No. 7, pp. 2271-2285, 2012.
- [4] J. B. Pendry, "Negative refraction makes a perfect lens", Phys. Rev. Lett., vol. 85, pp. 3966-3969, 2000.
- [5] X. Sanshui, S. Linfang, and H. Sailing, "A novel directional coupler utilizing a left-handed material", IEEE Photon. Tech. Lett., vol. 16, No. 1, pp. 171-173, 2004.
- [6] R. Rupp, "Surface polaritons of a left-handed medium", Phys. Lett. A, vol. 277, pp. 61-64, 2000.
- [7] Z. H. Wang, Z. Y. Xiao, and S. P. Li, "Guided modes in slab waveguides with a left handed material cover or substrate", Opt. Commun., vol. 281, pp. 607-613, 2008.
- [8] Z. Y. Xiao and Z. H. Wang, "Dispersion characteristics of asymmetric double-negative