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 انتشـار امواج در یک توری موجبری دی‌الکتریک سـاخته شـده از پوشـش فراماده را مطالعه می‌کنیم و به کمک تئوری اختلال، عبارتی برای ضریب جفت‌شدگی عرضی مدهای منتشر شده با قطبش TM درون توری‌های موجبری مستطیلی ارائه می‌شود. نمودار ضـریب جفت‌شـدگی توری موجبری با پوشـش ی از فراماده را با ضـریب جفت‌شـدگی توری موجبری معمولی مقایسـه می‌کنیم سپس ویژگی‌های خاص این ساختار را گزارش می‌دهیم. نشان می‌دهیم که برای چنین ساختاری امکان جفت‌شدگی برای مد اصلی وجود ندارد و یک مرتبه افزایش در ضریب جفت‌شدگی چنین ساختاری نسبت به ساختارهای موجبرهای معمولی وجود دارد.

کلید واژه- توری موجبری اپتیکی، ضریب جفت‌شدگی، 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.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

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.

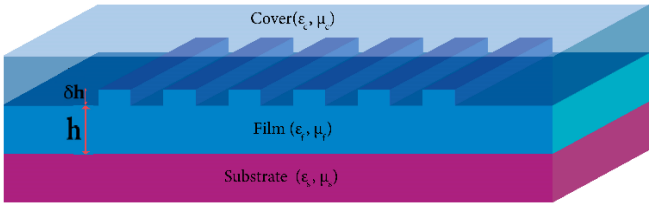
یکی از کاربردهای مورد توجه این مواد، هدایت امواج الکترومغناطیسی در موجبرهایی از این جنس می‌باشد که این مسئله اولین بار توسط راپین در سال ۲۰۰۰ نشان داده شد [۶]. به دنبال او گزارش‌هایی از موجبرهای متقارن و نامتقارن با لایه هایی از فراماده ارائه شد که معادله‌ی پاشندگی آن‌ها را مورد بررسی قرار می‌دادند و 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 آنجایی‌که 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.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

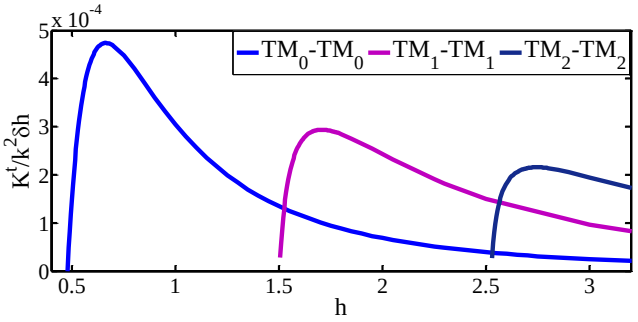
$$\frac{K^{t}_{\ell\upsilon 1}}{k^2\delta h}=\frac{c^2\varepsilon_c^{\,2}\lambda}{2\pi^2 N_\ell N_\upsilon}\left[(\mu_f-\mu_c)+\frac{N_\ell N_\upsilon}{c^2\varepsilon_c^{\,2}}(\varepsilon_f-\varepsilon_c)\right]\times$$
$$\frac{\sqrt{n_f^2k^2-N_\ell^2k^2}}{\sqrt{h/\varepsilon_f+\frac{1}{\varepsilon_c\sqrt{N_\ell^2k^2-n_c^2k^2}}+\frac{1}{\varepsilon_s\sqrt{N_\ell^2k^2-n_s^2k^2}}}}\times$$
$$\frac{\sqrt{n_f^2k^2-N_\upsilon^2k^2}}{\sqrt{h/\varepsilon_f+\frac{1}{\varepsilon_c\sqrt{N_\upsilon^2k^2-n_c^2k^2}}+\frac{1}{\varepsilon_s\sqrt{N_\upsilon^2k^2-n_s^2k^2}}}}\times$$
$$\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_c^{\,2}(n_f^2k^2-N_\ell^2k^2)+\varepsilon_f^{\,2}(N_\ell^2k^2-n_c^2k^2)}}\times$$
$$\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_c^{\,2}(n_f^2k^2-N_\upsilon^2k^2)+\varepsilon_f^{\,2}(N_\upsilon^2k^2-n_c^2k^2)}}$$

(۱)

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

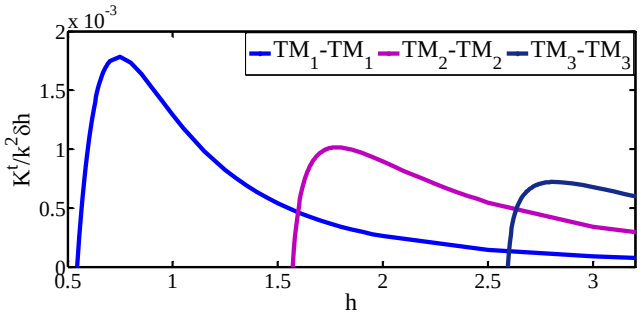
در رابطه‌ی بالا c سرعت نور در خلا، N ضریب شکست موثر، k ثابت انتشار در خلا، N_υ و N_ℓ به ترتیب ضریب شکست موثر υمین و ℓامین مد، h ضخامت فیلم، δh ارتفاع دندانه‌های متناوب توری، λ طول موج، ε_c،ε_s،ε_f و μ_f ،μ_s،μ_c و n_f،n_s،n_c به ترتیب ضریب گذردهی الکتریکی، ضریب تراوایی مغناطیسی و ضریب شکست لایه‌ی فیلم، زیرلایه و پوشش می‌باشند. به منظور مقایسه‌ی ضریب جفت‌شدگی عرضی توری موجبری با پوشش فراماده با ضریب جفت-شدگی توری موجبری با پوشش معمولی، ضریب جفت-شدگی 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.



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، حدودا 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

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

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

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 می شود زیرا این موجبر توانایی هدایت چنین مدی را ندارد. همچنین با افزایش شماره مد هدایت یافته، ضریب جفت-شدگی نیز کاهش می‌یابد.

مرجع‌ها

[1] V. G. Vesalago "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ε and μ", 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. Ruppin, "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 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. Chryssis, 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. Phy. Vol. 43, pp. 2327-2335, 1972.

[14] Ch. L. Chen, Foundations for Guided-Wave Optics, p. 33, Wiley-Interscience, Hoboken, NewJersey, 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.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]