بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

حالتهای تام قطبیده مغناطیسی عرضی غیرخطی در تیغه خود-واکانونی کننده مابین محیط همگن و بلور فوتونی حاوی فراماده

عینی زهرا[1]، میلانچیان کریم[1]

[1]گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵ تهران، ایران

چکیده - در این مقاله حالتهای سطحی(حالتهای تام) قطبیده *TM* منتشر شونده در تیغه غیرخطی که میان محیط همگن و بلور فوتونی شامل فراماده قرار گرفته است بررسی شده است. تیغه غیرخطی، خود-واکانونی کننده با تقریب تک محوری نوع اول (مولفه موازی با مرز تانسور ثابت دی الکتریک متناسب با مربع دامنه مولفه میدان الکتریکی موازی مرز) در نظر گرفته شده است. اثر ضخامت تیغه و همچنین تغییرات شدت میدان الکتریکی بر روی منحنی پاشندگی امواج جایگزیده TM بررسی شده است. نشان داده شده است که با افزایش شدت مولفه موازی مرز میدان الکتریکی در سطح تیغه، منحنی پاشندگی به سمت مرز بالایی نوار ممنوعه بلور فوتونی انتقال می یابد. علاوه براین با افزایش ضخامت تیغه ، منحنی پاشندگی دو نوع رفتار متفاوت، بسته به زاویه تابش نشان می دهد.

کلید واژه- امواج سطحی، بلور فوتونی، فراماده

TM Tamm States of a nonlinear slab sandwiched between a uniform medium and LHM Photonic Crystals

Eyni Zahra[1], Milanchian Karim [1]

[1] Department of Physics, Payame Noor University, PO BOX 19395-3697 Tehran, IRAN

Abstract- In this paper, the TM surface states (so called Tamm states) of a nonlinear self-defocusing slab sandwiched between a uniform medium and a one-dimensional photonic crystal is investigated in the uniaxial approximation. The effect of the thickness of slab and the intensity-dependent properties of surface states at the interface between air background and left-handed PC (made of alternate LHM and right-handed) are studied. We showed that by increasing the intensity of electrical field along the interface, the dispersion curve shifted to the upper boundary of PC. In addition, by increasing the thickness of the slab, dispersion curve shows two different behaviors depending on the angle of incidence.

Keywords: Photonic crystals, Metamaterials, Surface Waves

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

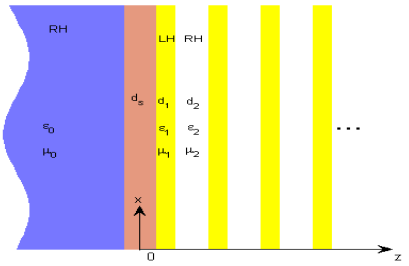
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

۱- مقدمه

همانطور که می دانیم بلورهای فوتونی ساختارهای دی الکتریک مصنوعی با مدولاسیون متناوب ضریب شکست، امکان کنترل خواص پاشندگی امواج الکترومغناطیسی به روش مشابه با خواص الکترونی در بلورها را فراهم می نماید. از طرفی فرامادهها (موادی با ضریب شکست منفی) بخاطر خواص فیزیکی جالب و منحصر بفرد یکی از موضوعات مهم مورد علاقه پژوهشگران در دهه های گذشته است[۱]. از کاربردهای امواج سطحی می‌توان به تزریق و استخراج باریکه کانونی شده در موجبرهای بلور فوتونی، همچنین استفاده از آنها در سنسورها، مدولاتورها و آینه‌های اتمی اشاره کرد[۳-۲]. به همین منظور مطالعه امواج سطحی تولید شده در فصل مشترک بلورهای فوتونی و محیطهای همگن توجه زیادی را به خود جلب کرده است[۴]. اغلب این مطالعات روی امواج سطحی TE صورت گرفته [۵] و امواج سطحی TM کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور در این مقاله امواج سطحی قطبیده TM غیرخطی در فصل مشترک میان محیط نیمه بی نهایت همگن و بلور فوتونی حاوی فرامادہ با لایه کلاهک غیرخطی بررسی شده است. با توجه به اینکه در معادلات ماکسول مربوط به امواج قطبیده مغناطیسی عرضی، هر دو مولفه میدان الکتریکی (مولفه های موازی و عمود بر مرز) ظاهر شده است، حل تحلیلی برای یافتن میدانهای الکتریکی و مغناطیسی پیچیده است. لذا در این مقاله از این تقریب استفاده شده است که مولفه موازی با مرز تانسور ثابت دی الکتریک تیغه متناسب با مربع دامنه مولفه میدان الکتریکی موازی مرز باشد. رابطه پاشندگی امواج سطحی TM غیرخطی را بطور تحلیلی بدست آورده و نشان می دهیم که با افزایش شدت مولفه موازی با مرز میدان الکتریکی در سطح تیغه، منحنی پاشندگی به سمت مرز بالایی نوار ممنوعه بلور فوتونی انتقال می یابد. علاوه براین با افزایش ضخامت تیغه ، منحنی پاشندگی دو نوع رفتار متفاوت بسته به زاویه تابش از خود نشان می دهد.

۲- مدلبندی

ساختار مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است خواص پاشندگی امواج سطحی TM جایگزیده شده در تیغه خود-واکانونی کننده که میان محیط همگن نیمه بی نهایت و بلور فوتونی حاوی فرامادہ قرار گرفته است را بررسی می کنیم.



شکل۱: ساختار هندسی مورد مطالعه با مشخصات: ε_z =2.405،
$n_0 = 1,\ n_1 = -2, d_1 = 0.5, n_2 = 2.5, d_2 = 1.8, \varepsilon_x = 2.405, d_S = 1.5 d_1$

تیغه غیرخطی با پهنای d_s دارای تانسور دی الکتریک قطری به شکل زیر است:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \qquad (۱)$$

با توجه به دستگاه مختصات انتخاب شده در شکل۱، میدان مغناطیسی موج قطبیده TM در جهت محور oy بوده و عبارت است از :

(۲)

$$\vec{H} = H_y(z) e^{i(k_0 \beta x - \omega t)} \hat{e}_y$$
$$\vec{E} = [E_x(z)\hat{e}_x + E_z(z)\hat{e}_z] e^{i(k_0 \beta x - \omega t)}$$

که در آن $k_0 = \frac{\omega}{c}$ بردار موج در خلا، β مولفه x بردار موج ($\beta = \frac{n_0 \omega}{c} \sin\theta$) که θ_0 زاویه تابش نور فرودی از محیط همگن نسبت به عمود بر سطح و $H_y(z)$ معرف دامنه میدان مغناطیسی در نواحی مختلف ساختار مورد مطالعه است. همانطوریکه می دانیم برای امواج قطبیده TM به دلیل وجود دو مولفه برای میدانهای الکتریکی حل تحلیلی معادلات ماکسول پیچیده می شود به همین منظور برای یافتن معادله پاشندگی از این تقریب استفاده می کنیم که:

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_x + \alpha |E_x|^2, \varepsilon_{zz} = \varepsilon_z$$

ε_x، ε_z قسمتهای خطی ضرایب دی الکتریک تیغه و α ضریب غیرخطی کر که برای محیطهای راستگرد خود-واکانونی کننده($\alpha < 0$) و برای فرامادہ خودواکانونی ($\alpha > 0$

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

) است[۴]. فرض کردیم که کل ساختار مورد مطالعه بدون اتلاف باشد. با در نظر گرفتن این تقریب معادلات ماکسول به معادلات زیر منجر می شود:

$$\frac{\partial^2 E_x^{(1)}}{\partial z^2} - q^2 E_x^{(1)} = 0,\ q^2 = k_0^2\beta^2 - k_0^2\varepsilon_1,\ z < -d_s$$
$$q^2 = k_0^2\beta^2 - k_0^2\varepsilon_0\mu_0 \qquad (۳)$$

$$\frac{\partial^2 E_x^{(2)}}{\partial z^2} - \frac{k_s^2}{\varepsilon_x}\left[\varepsilon_x + \alpha\left(E_x^{(2)}\right)^2\right]E_x^{(2)} = 0,\ -d_s < z < 0$$

که در آن: $k_s^2 = k_0^2\beta^2 - k_0^2\varepsilon_x$

با انتگرالگیری از معادله (۳) به معادله زیر می رسیم:

$$\left(\frac{\partial y}{\partial z}\right)^2 - \frac{k_s^2}{\varepsilon_x}\left[\varepsilon_x y^2 + \frac{\alpha y^4}{2}\right] = c, -d_s < z < 0 \quad (٤)$$

که برای سادگی $y = E_x^{(2)}(z)$ فرض شده است. c ثابت انتگرالگیری از شرایط مرزی بدست می آید.

$$c = E_0^2\left[\left(\frac{k_s^2}{q}\right)^2\left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_z}\right)^2 - k_2^2\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} - \frac{\gamma_0 k_2^2}{2\varepsilon_z}\right] =$$
$$E_b^2\left[\left(\frac{k_s^2}{k_1}\right)^2\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_z}\right)^2\tilde{R}^2 - k_s^2\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} - \frac{\alpha k_s^2}{2\varepsilon_z}E_b^2\right] \qquad (۵)$$

که در آن:

$$\tilde{R} = -i\left(\frac{B + (\lambda - A)}{B - (\lambda - A)}\right), \gamma_0 = \alpha\left|E_x(z = -ds)\right|^2$$

λ ویژه مقدار ماتریس انتقال در نوار ممنوعه بلور فوتونی، A وB عناصر ماتریس انتقال بلور فوتونی است[۴]. E_0^2 و E_b^2 به ترتیب معرف شدت مولفه موازی مرز میدان الکتریکی به ترتیب در ابتدا و انتهای تیغه است. این معادله، پاشندگی امواج سطحی TM غیرخطی در تیغه خود-واکانونی کننده که مابین محیط همگن و بلور فوتونی حاوی فراماده قرار گرفته است را بیان می کند، مشروط بر اینکه مقادیر میدان در نقاط ابتدا و انتهایی تیغه غیرخطی معلوم باشد. جواب معادله (۴) برای تیغه غیرخطی خود-واکانونی کننده به شکل زیر بدست می آید.

$$E_x^{(2)}(z) = b \times nd\left(z_0 + a\sqrt{|\zeta|}(z + ds)\middle|m\right) \qquad (۶)$$

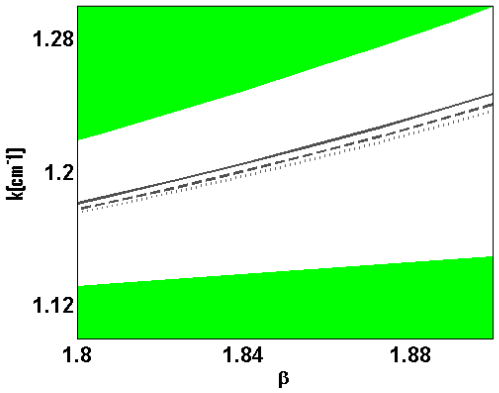
که در آن که در آن nd تابع بیضوی ژاکوبی و m مدول آن می باشد[۶]. پارامترهای ظاهر شده در این تابع عبارت است از:

$$a^2 = \frac{\delta + \sqrt{\delta^2 - 4G}}{2},\ \delta = \frac{k_f^2\varepsilon_x}{\varepsilon_z|\zeta|},\ G = \frac{|c|}{|\zeta|},\ \zeta = \frac{k_s^2\alpha}{2\varepsilon_z}$$

$$b^2 = \frac{\delta - \sqrt{\delta^2 - 4G}}{2},\ m = \frac{a^2 - b^2}{a^2}, z_0 = nd^{-1}\left(\frac{E_0}{b}\middle|m\right)$$

۱-۲- بحث و نتایج

با توجه به معادله (۵) مشاهده می شود که پاشندگی به ضخامت و مولفه موازی مرز شدت میدان الکتریکی در سطح تیغه غیرخطی γ_0 بستگی دارد. شکل(۲) پاشندگی امواج سطحی غیرخطیTM را در حضور تیغه خود-واکانونی کننده در اولین گاف باند بلور فوتونی حاوی فراماده روی صفحه (k, β) نشان می دهد. با توجه به شکل (۲) مشاهده می شود که با افزایش γ_0 منحنی پاشندگی به سمت مرز بالایی نوار ممنوعه بلور فوتونی انتقال می یابد.



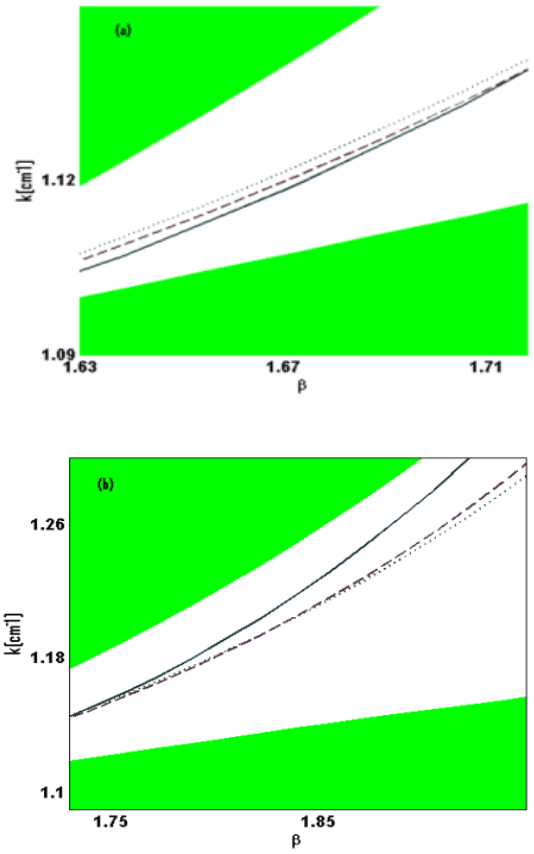
شکل۲: منحنی پاشندگی امواج سطحی TM در حضور تیغه خود-واکانونی کننده روی صفحه(k, β)در اولین نوار ممنوعه بلور فوتونی حاوی فراماده به ازای $d_S = 1.5d_1$. نواحی هاشور خورده اولین نوار ممنوعه بلور فوتونی را نشان می دهد. منحنی های نقطه چین ، خط چین و توپر پاشندگی امواج سطحی را به ترتیب به ازای حالت خطی، $\gamma_0 = 0.25, 0.5$ نشان می دهد

با توجه به شکل (۲) مشاهده می شود که با افزایش γ_0 منحنی پاشندگی به سمت مرز بالایی نوار ممنوعه بلور فوتونی انتقال می یابد. مطالعات ما نشان داد که رفتار منحنی پاشندگی بر حسب ضخامت تیغه غیرخطی به مقدار زاویه تابش بستگی دارد. شکل(۳) منحنی پاشندگی امواج سطحی

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

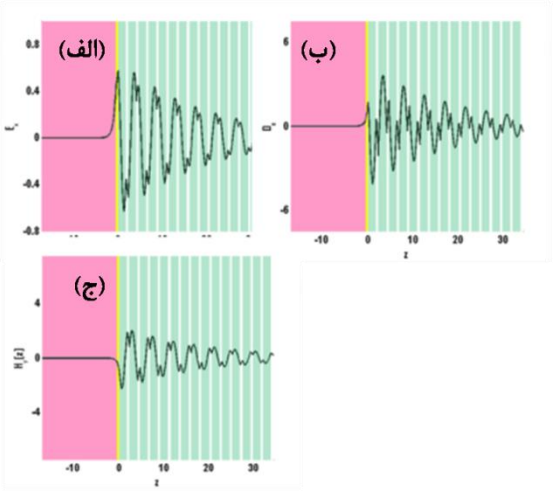
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

غیرخطی TM را بر حسب ضخامت تیغه غیرخطی و به ازای $\gamma_0 = -0.5$ نشان می دهد.



شکل۳: منحنی پاشندگی امواج سطحی TM در حضور تیغه خود-واکانونی کننده روی صفحه (k,β) در اولین نوار ممنوعه بلور فوتونی حاوی فراماده به ازای $\gamma_0 = -0.5$ الف): $1.63 < \beta < 1.73$ و ب): $1.73 < \beta < 1.94$. منحنی های نقطه چین ، خط چین و توپر پاشندگی امواج سطحی را به ترتیب به ازای ، $d_s = 3d_1,\ 2d_1, 1.5d_1$ نشان می دهد.

با توجه به شکل (۳) مشاهده می شود به زوایای تابش متناظر با $1.63 < \beta < 1.73$ با افزایش ضخامت تیغه، منحنی پاشندگی به سمت مرز پایینی و به ازای $1.73 < \beta < 1.94$) به سمت مرز بالایی بلور فوتونی انتقال می یابد. همچنین در این ساختار، شکل میدان مغناطیسی و مولفه های میدان الکتریکی امواج سطحی قطبیده غیرخطی TM را مطالعه کردیم. شکل (۴) نیمرخ عرضی میدانهای مغناطیسی و مولفه های میدان الکتریکی مدهای سطحی غیرخطی قطبیده TM را به ازای مقادیر مشخص $\gamma_0 = -0.5,\ d_s = 1d_1$ نشان می دهد.



شکل۴: نیمرخ عرضی میدانهای مغناطیسی و الکتریکی بر حسب مختصه z به ازای $d_S = 1d_1, \gamma_0 = -0.2, \beta = 1.806,$ $k = 1.185, z_0 = 0.279253$

الف): $E_X(z)$ ب): $D_Z(z)$ ج): $H_y(z)$

۲-۲- نتیجه گیری

در این مقاله امواج سطحی قطبیده TM در تیغه خود-واکانونی کننده ای که مابین محیط همگن و بلورفوتونی حاوی فراماده قرار گرفته است بررسی شد. مطالعات ما نشان داد که منحنی پاشندگی این امواج با افزایش γ_0 به سمت مرز بالایی بلور فوتونی انتقال می یابد. همچنین با افزایش ضخامت تیغه منحنی پاشندگی دو نوع رفتار متفاوت را بسته به زاویه تابشی نشان می دهد .

مراجع

[1] Pendry, J. B. "*Negative refraction Makes a perfect lens*", Phys. Rev. Lett. 85: 3966, 2000.

[2] Moreno, E. MartÌn-Moreno, L. and F. J. Garcìa-Vidal. "*Efficient coupling of light into and out of a photonic crystal waveguide via surface modes*", Photon Nanostruct. 2: 97-102, 2004.

[3] Villa, F. Regulando and Romas-Mendieted, F. "*Photonic Crystal sensors based on surface waves for thin film characterization*", Opt. Lett. 27:646-648, 2002.

[4] Z. Eyni, A. Namdar, S. Roshan Entezar and H. Tajalli, "Dispersion properties of nonlinear surface waves in one-dimensional photonic crystals with a nonlinear self-defocusing cap layer of left-handed metamaterial" J. Opt. Soc. Am. B, 27, 2010.

[5] Z. Eyni, A. Namdar, S. Roshan Entezar and H. Tajalli, *P I Electromagnetics Research Letter*. **18**, *115*-124, *2010*.

[6] M. Abramowitz,. and A.S. Stegun, "Handbook of mathematical function". Dover, New York, 1972.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]