

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'، میلانچیان کریم'

اگروه 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. اثر ضخامت تیغه و مهچنین تغییرات مرز میدان الکتریکی بر روی منحنی پاشندگی امواج جایگزیده TM بررسی شده است. نشان داده شده است که با افزایش شدت مولفه موازی تیغه ، منحنی پاشندگی 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.

كليد واژه- امواج سطحى، بلور فوتونى، فراماده

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

Eyni Zahra¹, Milanchian Karim¹

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

۱– مقدمه

همانطور که می دانیم بلورهای فوتونی ساختارهای دی الكتريك مصنوعي با مدولاسيون متناوب ضريب شكست، امكان كنترل خواص پاشندگی امواج الكترومغناطیسی به روش مشابه با خواص الكتروني در بلورها را فراهم مي نمايد. از طرفي 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[۲-۲]. به همین منظور مطالعه امواج سطحی تولید شده در فصل مشترک بلورهای فوتونی و محیطهای همگن توجه زیادی را به خود جلب كرده است[۴]. اغلب اين مطالعات روى 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 نيمه بي نهايت همگن و بلور فوتوني حاوي فراماده با لايه کلاهک غیرخطی بررسی شده است. با توجه به اینکه در معادلات ماكسول مربوط به امواج قطبيده مغناطيسي عرضي، 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 دى الكتريك تيغه متناسب با مربع دامنه مولفه ميدان الكتريكي موازى مرز باشد. رابطه پاشندگي امواج سطحي TM غيرخطي را بطور تحليلي بدست آورده و نشان مي دهيم كه با افزایش شدت مولفه موازی با مرز میدان الکتریکی در سطح تيغه، منحنى پاشندگى به سمت مرز بالايى نوار ممنوعه بلور فوتونى انتقال مى يابد. علاوه براين با افزايش ضخامت تيغه ، 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 فراماده قرار گرفته است را بررسی می کنیم.



 ε_z =2.405 شکل ۱: ساختار هندسی مورد مطالعه با مشخصات: ε_z =2.405 شکل ۱: ساختار هندسی مورد مطالعه با مشخصات: $n_0 = 1, n_1 = -2, d_1 = 0.5, n_2 = 2.5, d_2 = 1.8, \varepsilon_x = 2.405, d_s = 1.5d_1$

تيغه غيرخطى با پهناى d_s داراى تانسور دى الكتريک قطرى به شکل زير است:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}$$
 (1)

با توجه به دستگاه مختصات انتخاب شده در شکل ۱، 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 $\frac{\omega}{c} = \frac{\omega}{c}$ بردار موج در خلا، β مولفه x بردار موج $k_0 = \frac{\omega}{c}$ بردار موج $(\beta + 1)$ مولف x بردار موج $(\beta + 1)$ معرف دامنه $(\beta + 1)$ معرف دامنه همگن نسبت به عمود بر سطح و (z) معرف دامنه میدان مغناطیسی در نواحی مختلف ساختار مورد مطالعه است. همانطرریکه می دانیم برای امواج قطبیده TM به دلیل است. همانطرریکه 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: $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_x + \alpha |E_x|^2$

lpha قسمتهای خطی ضرایب دی الکتریک تیغه و \mathcal{E}_z ، \mathcal{E}_x - ضریب غیرخطی کر که برای محیطهای راستگرد خود lpha > 0 واکانونی کننده($0 < \alpha > 0$) و برای فراماده خودواکانونی (

است[۴]. فرض کردیم که کل ساختار مورد مطالعه بدون
تلاف باشد. با در نظر گرفتن این تقریب معادلات ماکسول به
معادلات زیر منجر می شود:
$$\frac{\partial^2 E_x^{(1)}}{\partial z^2} - q^2 E_x^{(1)} = 0, \ q^2 = k_0^2 \beta^2 - k_0^2 \varepsilon_1, \ z < -d_s$$

 $q^2 = k_0^2 \beta^2 - k_0^2 \varepsilon_0 \mu_0$ (۳)

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

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

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

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

$$\sum k_x y^2 + \frac{\alpha y^4}{2} = c, -d_s < z < 0 \quad (\pounds)$$

$$\sum k_y z < z < 0 \quad (\pounds)$$

$$\sum k_z z < z < 0 \quad (\pounds)$$

$$\sum k_z z < z < 0 \quad (\pounds)$$

$$\sum k_z z < z < 0 \quad (\pounds)$$

$$\sum k_z z < z < 0 \quad (\pounds)$$

$$\sum k_z z < z < 0 \quad (\pounds)$$

$$\sum k_z z < z < 0 \quad (\pounds)$$

$$\sum k_z z < z < 0 \quad (\pounds)$$

$$\sum k_z z < 0 \quad (\pounds)$$

$$E_b^2 \left[\left(\frac{k_s^2}{k_1} \right)^2 \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_z} \right)^2 \tilde{R}^2 - k_s^2 \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} - \frac{\alpha k_s^2}{2\varepsilon_z} E_b^2 \right] \quad (\Delta)$$

که در آن:

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

 Λ ویژه مقدار ماتریس انتقال در نوار ممنوعه بلور فوتونی، A و وB عناصر ماتریس انتقال بلور فوتونی است [4]. $E_b^2 e_0^2 e_0^3$ 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.

$$E_x^{(2)}(z) = b \times nd \left(z_0 + a \sqrt{|\zeta|} (z + ds) \middle| m \right) \tag{8}$$

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:

$$a^{2} = \frac{\delta + \sqrt{\delta^{2} - 4G}}{2}, \ \delta = \frac{k_{f}^{2} \varepsilon_{x}}{\varepsilon_{z} |\zeta|}, \ G = \frac{|c|}{|\zeta|}, \ \zeta = \frac{k_{s}^{2} \alpha}{2\varepsilon_{z}}$$
$$b^{2} = \frac{\delta - \sqrt{\delta^{2} - 4G}}{2}, \ m = \frac{a^{2} - b^{2}}{a^{2}}, \ z_{0} = nd^{-1} \left(\frac{E_{0}}{b} | m\right)$$

۲-۲- 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 در اولین گاف باند بلور فوتونی حاوی فراماده روی صفحه شود که با افزایش γ_0 منحنی پاشندگی به سمت مرز بالایی نوار ممنوعه بلور فوتونی انتقال می یابد.



شکل ۲: منعنی 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. منعنی های نقطه چین ، خط چین و توپر پاشندگی امواج سطحی را به ترتیب به ازای حالت خطی، $\gamma_0 = 0.25, 0.5$

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



شكل ۴: نيمرخ عرضی ميدانهای مغناطيسی و الكتريكی بر حسب مختصه $d_s = 1d_1, \gamma_0 = -0.2, \beta = 1.806,$ $E_x(z)$ (الف): ($z = 1.185, z_0 = 0.279253$ $H_y(z)$ ج): ($z = D_z(z)$)

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

- 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 onedimensional 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.





شكل ٣: منحنى پاشندگى امواج سطحى TM در حضور تيغه خود-واكانونى كننده روى صفحه (k, β) در اولين نوار ممنوعه بلور فوتونى حاوى فراماده به ازاى 0.5 = -0.7 الف): $1.73 > \beta > 1.63$ و ب): فراماده به ازاى 7.1 = -0.5 منحنى هاى نقطه چين ، خط چين و توپر پاشندگى امواج سطحى را به ترتيب به ازاى ، پاشندگى امواج 3 d_1 , $2d_1$, $1.5d_1$

با توجه به شکل (۳) مشاهده می شود به زوایای تابش متناطر با $1.63 < \beta > 1.73$ با افزایش ضخامت تیغه، منحنی پاشندگی به سمت مرز پایینی و به ازای $1.94 > \beta > 1.73$) 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 $1d_1 = -0.5$, $d_s = 1d_1$ نشان