

صافی‌های تنظیم‌پذیر M-کاناله بر پایه ساختارهای تیو-مورس نامتجانس حاوی شبه‌مواد

حمید پاشایی عدل، صمد روشن انتظار

دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۹/۱۹؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۳/۵/۱۴)

چکیده

در این مقاله صافی‌های چند کاناله، بر پایه ساختارهای تیو-مورس حاوی شبه‌مواد تک منفی مطالعه شده است. نشان داده شده است که تعداد مدهای تشدیدی در داخل گاف نوار فاز-صفر با افزایش تعداد فصل مشترک‌ها (M) افزایش می‌یابد. تعداد این مدهای تشدیدی دقیقاً برابر با تعداد فصل مشترک‌ها است و می‌توانند به عنوان صافی‌های M -کاناله استفاده شوند. زمانی که اتلاف در نظر گرفته شود، نتایج نشان می‌دهد که میدان الکتریکی مدهای تشدیدی با افزایش تعداد فصل مشترک‌ها (M) و عامل میرایی، میرا تر می‌شود. همچنین ارتباط بین عامل کیفیت صافی‌های چند کاناله و تعداد فصل مشترک‌ها (M) بصورت خطی است و عامل کیفیت، با افزایش عامل میرایی، کاهش می‌یابد. این نتایج روشی را فراهم می‌سازد که بتوان با استفاده از تعداد کانال‌ها و عامل کیفیت صافی‌های چند کاناله را کنترل و تنظیم کرد.

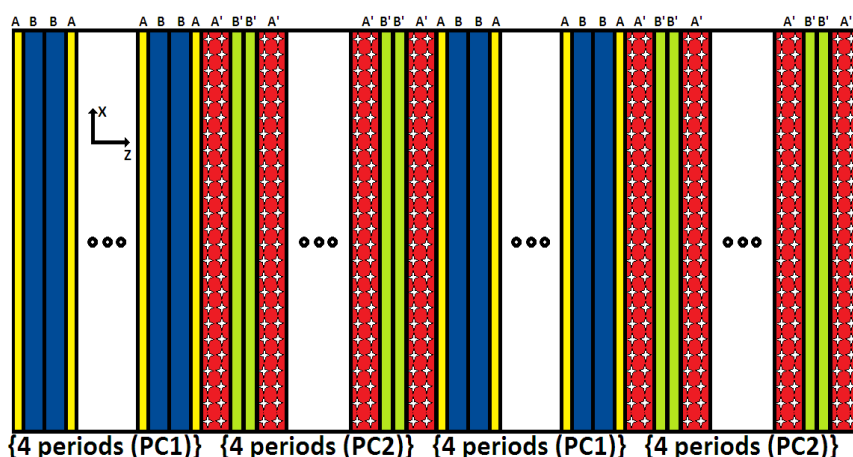
واژه‌های کلیدی: ساختارهای نامتجانس، صافی‌های M -کاناله، عامل کیفیت

۱. مقدمه

استفاده از مواد با ضریب شکست مثبت بسیار مشکل است به این دلیل از شبه‌مواد تک منفی استفاده می‌کنیم [۳-۱۰]. که محیط‌های مو-منفی با تراوایی مغناطیسی منفی، ولی گذردهی الکتریکی مثبت است، و اپسیلون-منفی، گذردهی الکتریکی منفی، ولی تراوایی مغناطیسی مثبت، را در بر می‌گیرد. از خواص جالب ساختارهای حاوی شبه‌مواد تک منفی بوجود آمدن گاف نوار فاز مؤثر-صفر است که یک گاف نوار همه سویه می‌باشد. که دارای خواص اپتیکی جالبی است. ساختارهای متفاوتی بصورت متناوب و غیر متناوب (بی‌نظم) از بلورهای فوتونی رایج شده است. با توجه به آرایش ساختاری،

اخیراً صافی‌های فوتونی تنظیم‌پذیر به خاطر کاربردهای بسیار مهمی که در ارتباطات و محاسبات اپتیکی فوق سریع پیدا کرده‌اند، توجه محققان بسیاری را به خود جلب کرده است. حجم اطلاعاتی که توسط صافی‌های M -کاناله انتقال داده می‌شود [۱ و ۲]، M برابر حالتی است که این اطلاعات توسط سیستم‌های تک کاناله انتقال داده می‌شود، بنابراین صافی‌های چند کاناله نقش مهمی را در تکنولوژی ارتباطات نوری ایفا می‌کنند. با توجه به این که ساخت صافی‌های همه سویه^۱ با

۱. Omnidirectional filters



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طرح شماتیکی از ساختار مورد بررسی که از دو بلور فوتونی متفاوت حاوی شبه‌ماده ساخته شده است.

$$\mu_{A(A')} = \mu_a,$$

$$\varepsilon_{A(A')} = \varepsilon_a - \frac{\alpha}{\omega^2},$$

$$\varepsilon_{B(B')} = \varepsilon_b, \mu_{B(B')} = \mu_b - \frac{\beta}{\omega^2},$$

به طوری که: $\varepsilon_b = \mu_a = 3$, $\varepsilon_a = \mu_b = 2$, $\alpha = \beta = 100$ و ضخامت لایه‌ها عبارت‌اند از $d_A = 6 \text{ mm}$, $d_{A'} = 18 \text{ mm}$, $d_B = 15 \text{ mm}$ و $d_{B'} = 9 \text{ mm}$.

۳. بحث و بررسی نتایج بدست آمده

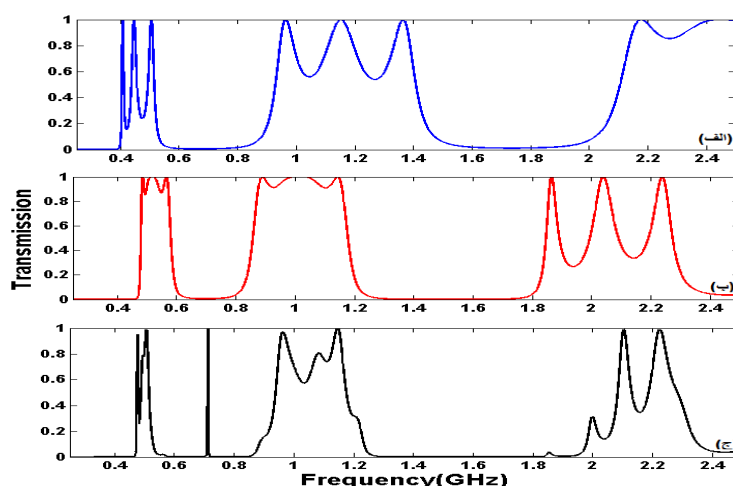
قابلیت عبوردهی بلورهای فوتونی PC_1, PC_2 و ساختار نامتجانس $(PC_2 PC_1)$ برای مد TE در حالت تابش عمودی در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲ (الف) و شکل ۲ (ب) مشاهده می‌شود که برای بلورهای PC_1 و PC_2 هیچ مد تشدیدی در داخل گاف نوار وجود ندارد، ولی وقتی که این دو بلور به هم می‌پیوندند و ساختار نامتجانس $(PC_2 PC_1)$ را بوجود می‌آورند، یک مد تشدید با عبوردهی بالا، در داخل گاف نوار فاز-صفر ظاهر می‌شود (شکل ۲ (ج)). روش به کار رفته در این مسئله روش ماتریس انتقال است. در این روش میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی در انتهای یک لایه توسط ماتریس انتقال به میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی در ابتدای لایه بعد مربوط می‌شود، میدان در داخل هر یک از لایه‌ها به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$E_L(x, z) = E(z) e^{i(k_x x + k_z z) - i\omega t}, \quad (1)$$

مواد مورد استفاده و تعداد لایه‌های تشکیل دهنده ساختار، بلور فوتونی حاصل ویژگی‌های خاصی را از خود نشان می‌دهد. یکی از ساختارهای بلور فوتونی بی‌نظم که اخیراً معرفی شده است، ساختار تیو-مورس می‌باشد [۱۱]. این ساختار دارای سری‌های متعددی است که در هر سری تعداد و آرایش لایه‌ها متفاوت است (برای مثال سری ۲ به صورت BA و سری ۳ به صورت $ABBA$ و...) در این مقاله ما با استفاده از روش ماتریس انتقال [۱۲] صافی‌های چند کاناله را که بر پایه سری سوم ساختارهای تیو-مورس حاوی شبه‌مواد تک منفی ساخته شده‌اند بررسی کرده‌ایم، که این صافی‌ها از ساختارهای نامتجانس که از کنار هم قرار دادن این بلورهای نامنظم (تیو-مورس) ایجاد می‌شوند، به وجود می‌آیند. نشان داده شده است که تعداد مدهای تشدیدی ایجاد شده در داخل گاف فاز-صفر دقیقاً برابر تعداد فصل مشترک‌های موجود در ساختار است و همچنین ارتباط بین عامل کیفیت و فصل مشترک‌ها خطی و ارتباط آن با عامل میرایی معکوس است، یعنی با افزایش عامل میرایی عامل کیفیت کاهش می‌یابد.

۲. فرمول‌بندی مسئله و ساختار مورد استفاده

ساختار به کار رفته در این مقاله بصورت $(PC_1 PC_2)_N$ است، که $PC_2 = [(A'B'B'A')_r]$ و $PC_1 = [(ABBA)_r]$ است (شکل ۱). N تعداد تناوب ساختارهای نامتجانس است و داریم



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) قابلیت عبوردهی بر حسب فرکانس بلورهای فوتونی، (الف) PC_1 ، (ب) PC_2 و (ج) (PC_2PC_1) در حالت تابش عمودی.

که در آن

$$k_{zL} = k_0 \sqrt{\epsilon_L \mu_L (1 - \sin^2 \theta / \epsilon_L \mu_L)},$$

$$L = A, A', B, B', k_x = k_0 \sin \theta, k_0 = \omega / c,$$

و θ زاویه تابش است. همچنین میدان در داخل هر یک از لایه‌ها از معادله هلمهولتز پیروی می‌کند [۱۳]:

$$\frac{d^2 E}{dz^2} + (\epsilon_L \mu_L \frac{\omega^2}{c^2} - k_x^2) E = 0. \quad (2)$$

و در فصل مشترک بین لایه‌ها شرایط مرزی زیر حاکم است:

$$E_i = E_j,$$

$$\frac{1}{\mu_i} \frac{dE}{dz_i} = \frac{1}{\mu_j} \frac{dE}{dz_j}, \quad (3)$$

$$M_L = \begin{bmatrix} \cos(k_{zL} \Delta z) & -\frac{\mu_L \omega}{k_{zL} c} \sin(k_{zL} \Delta z) \\ \frac{k_{zL} c}{\mu_L \omega} \sin(k_{zL} \Delta z) & \cos(k_{zL} \Delta z) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

ماتریس انتقال برای کل ساختار به صورت زیر خواهد بود که در آن q تعداد کل لایه‌های ساختار را نشان می‌دهد.

$$M_{\text{global}} = \prod_{L=1}^q M_L, \quad (5)$$

یدان‌ها در ابتدا و انتهای ساختار به صورت زیر به هم ارتباط پیدا می‌کنند:

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ H_1 \end{pmatrix}_{z=0} = M_{\text{global}} \begin{pmatrix} E_N \\ H_N \end{pmatrix}_{z=qL} \quad (6)$$

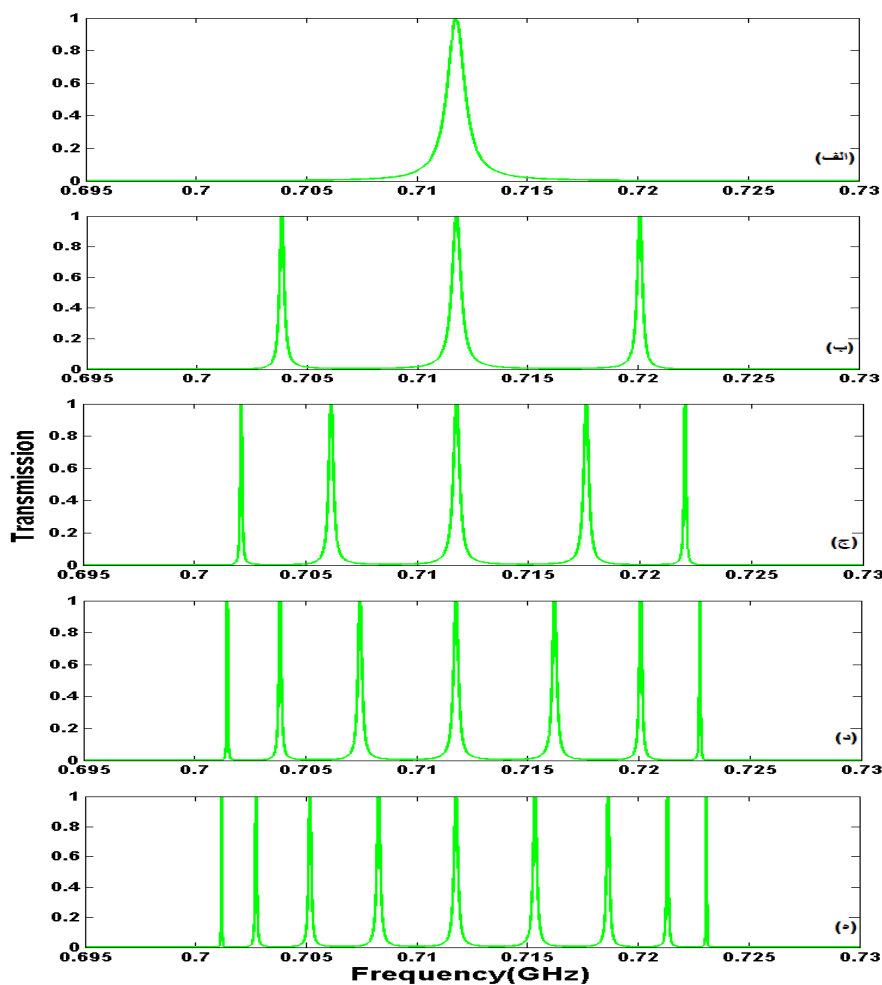
با توجه به شکل ۲ می‌توان مشاهده کرد که گاف براگ برای ساختارهای نامتجانس عریض‌تر از گاف براگ تک تک بلورهای

PC_2, PC_1 است در واقع می‌توان با استفاده از ساختارهای نامتجانس گاف نوار براگ را عریض‌تر کرد. برای بررسی ارتباط بین تعداد مدهای تشدید و تعداد تناوب (N) بلورهای فوتونی نامتجانس $(PC_1PC_2)_N$ ، پنج دوره را به صورت $(N = 1, 2, 3, 4, 5)$ در نظر می‌گیریم. قابلیت عبوردهی این پنج حالت در شکل ۳ نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد دوره‌ها تعداد مدهای تشدید نیز افزایش می‌یابد، در واقع تعداد مدهای تشدید ایجاد شده برابر است با تعداد فصل مشترک‌های (M) موجود در ساختار و با افزایش فصل مشترک‌ها، تعداد مدهای تشدید نیز افزایش می‌یابد. یعنی یک بلور فوتونی به صورت $(PC_1PC_2)_N$ با $(2N - 1)$ فصل مشترک دارای $(2N - 1)$ مد تشدید است و این مدهای تشدید دارای اهمیت بالایی هستند، زیرا می‌توانند به عنوان صافی‌های چندکاناله مورد استفاده قرار گیرند. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد دوره‌های بلور فوتونی نامتجانس همچنان مد تشدید مرکزی در فرکانس ۰/۷۱۱۸ GHz جایگزیده می‌ماند.

۳.۱. تأثیر اتلاف بر روی صافی‌های چند کاناله

برای بررسی تأثیر اتلاف بر روی صافی‌های چندکاناله، گذردهی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی لایه‌های تک منفی را به صورت



شکل ۳. قابلیت عبوردهی بر حسب فرکانس برای بلور $(PC \times PC)_N$ در حالات: (الف) $N=1$ ، (ب) $N=2$ ، (ج) $N=3$ ، (د) $N=4$ ، (ه) $N=5$.

تعداد فصل مشترک‌ها در ساختار زیاد نباشد.

۳.۲. عامل کیفیت صافی‌های چند کاناله

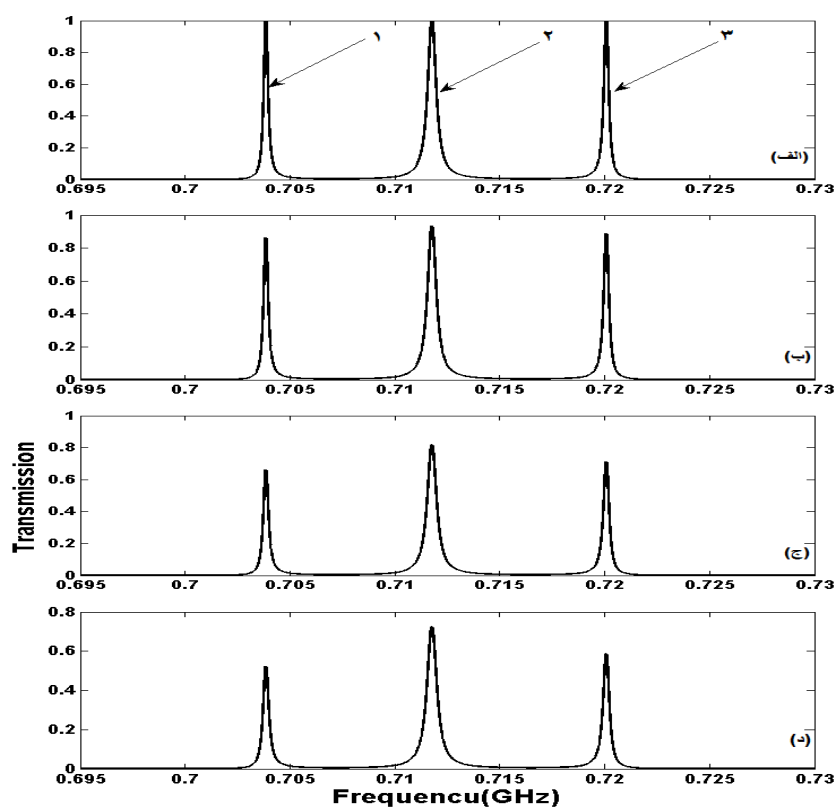
عامل کیفیت (Q) مهمترین پارامتر صافی‌ها است و به صورت نسبت فرکانس مرکزی به پهنا در نصف بیشینه (FWHM) مدهای تشدید می‌محاسبه می‌شود. در شکل ۶ ما عامل کیفیت (Q) را به ازای تعداد فصل مشترک (M) محاسبه کرده‌ایم. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد فصل مشترک‌ها عامل کیفیت افزایش می‌یابد.

برای نشان دادن تأثیر اتلاف روی کیفیت صافی‌های چندکاناله عامل کیفیت بلور فوتونی $(PC \times PC)_2$ به ازای مقادیر مختلف عامل میرایی محاسبه شده است (شکل ۷).

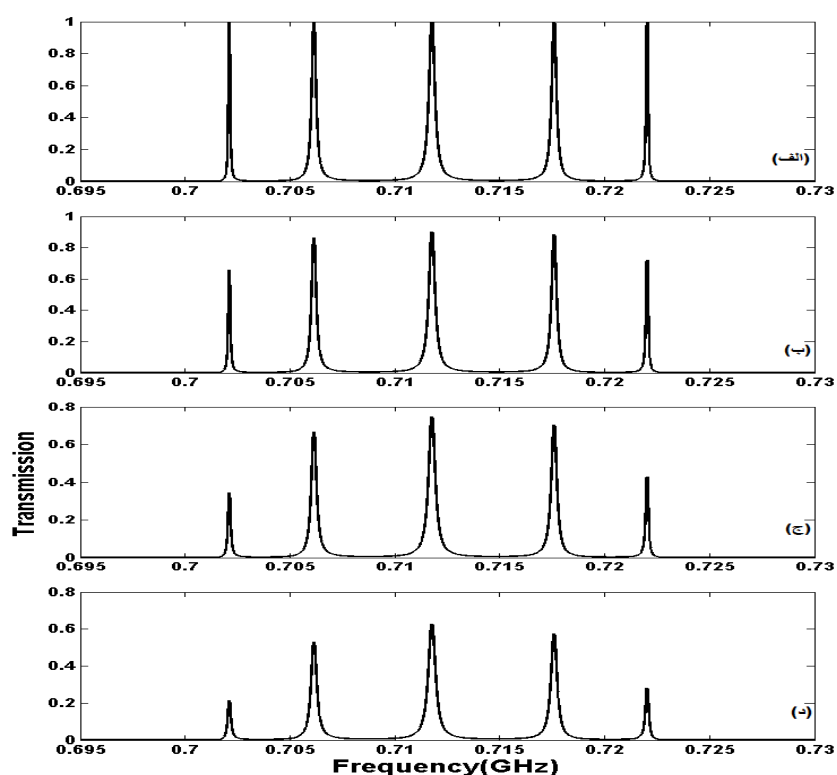
$$\mu_{B(B')} = \mu_b - \frac{\beta}{\omega^2 + i\omega\gamma_m} \quad \varepsilon_{A(A')} = \varepsilon_a - \frac{\alpha}{\omega^2 + i\omega\gamma_e}$$

در نظر می‌گیریم که در اینجا γ_e و γ_m به ترتیب عامل میرایی الکتریکی و مغناطیسی هستند که ما فرض کرده‌ایم که $\gamma_m = \gamma_e = \gamma$ در شکل ۴ و شکل ۵ نمودار عبوردهی نمودارهای عبوردهی بر حسب فرکانس در حالت وجود اتلاف نشان داده شده است.

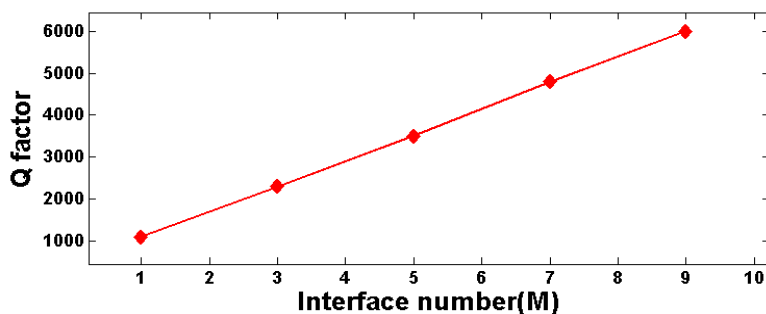
مشاهده می‌شود که میدان الکتریکی مدهای تشدید با افزایش تعداد فصل مشترک‌ها بیشتر می‌شود و در ضمن با افزایش عامل میرایی، مد تشدید مرکزی خیلی آرام‌تر از مدهای تشدید کناری میرا می‌شود و این بیانگر این مسئله است که ما برای ساختن صافی‌های چندکاناله باید از مواد با اتلاف پایین استفاده کنیم و همچنین تا حد ممکن سعی کنیم



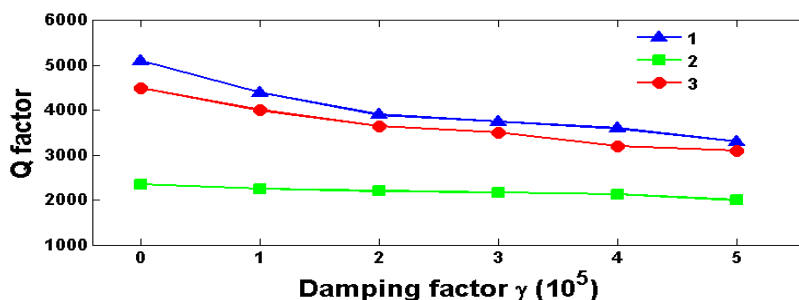
شکل ۴. قابلیت عبوردهی بلور فوتونی $(PC1/PC2)$ به ازای مقادیر مختلف عامل میرایی. (الف) $\gamma = 0$ ، (ب) $\gamma = 1 \times 10^5 \text{ Hz}$ ، (ج) $\gamma = 3 \times 10^5 \text{ Hz}$ و (د) $\gamma = 5 \times 10^5 \text{ Hz}$.



شکل ۵. قابلیت عبوردهی بلور فوتونی $(PC2/PC1)$ به ازای مقادیر مختلف عامل میرایی. (الف) $\gamma = 0$ ، (ب) $\gamma = 1 \times 10^5 \text{ Hz}$ ، (ج) $\gamma = 3 \times 10^5 \text{ Hz}$ و (د) $\gamma = 5 \times 10^5 \text{ Hz}$.



شکل ۶. عامل کیفیت صافی‌های چندکاناله به ازای تعداد متفاوت فصل مشترک‌های بلور فوتونی $(PC \times PC)_N$.



شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تغییرات عامل کیفیت صافی چندکاناله $(PC \times PC)_p$ به ازای مقادیر مختلف عامل میرایی (۱) تغییرات عامل کیفیت کانال ۱، (۲) تغییرات عامل کیفیت کانال ۲، (۳) تغییرات عامل کیفیت کانال ۳ که همگی متناظر با شکل ۴ (الف) می‌باشند.

۴. نتیجه‌گیری

مشترک‌های موجود در ساختار وقتی که اتلاف را وارد می‌کنیم نشان داده شده است که با افزایش فصل مشترک‌ها و عامل میرایی میدان الکتریکی مدهای تشدیدی میرا می‌شوند. با افزایش عامل میرایی میدان الکتریکی مد مرکزی خیلی کندتر از میدان الکتریکی مدهای کناری میرا می‌شود. همچنین نشان داده شده است که عامل کیفیت صافی‌های چند کاناله دارای یک ارتباط خطی با تعداد فصل مشترک‌ها است و این عامل با افزایش عامل میرایی کاهش می‌یابد.

در این مقاله صافی‌های تنظیم‌پذیر چندکاناله بر پایه ساختارهای تیو-مورس نامتجانس حاوی شبه‌مواد تک منفی، با استفاده از روش ماتریس انتقال مورد بررسی قرار گرفته است. نشان داده شده است که با افزایش تعداد فصل مشترک‌های موجود در ساختار تعداد مدهای تشدیدی ایجاد شده در داخل گاف نوار فاز-صفر افزایش می‌یابد. در واقع تعداد مدهای ایجاد شده در داخل گاف نوار فاز-صفر دقیقاً برابر است، با تعداد فصل

مراجع

1. D X Hua, L N Hua, and A L Ping, *Chinese Science Bulletin* **54** (2009) 1002.
2. X Hu, Z Liu, and Q Gong, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **9** (2007) 877.
3. H T Jiang, H Chen, and H Q Li, *Phys. Rev. E* **69** (2004) 066607.
4. S M wang and L Gao, *Opt. Comm.* **267** (2006) 197.
5. K Y Kim, *Opt. Lett.* **30** (2005) 430.
6. L G Wang, H Chen, and S Y Zhu, *Phys. Lett. A* **350** (2006) 410.
7. X H Deng and N H Liu, *Chin. Phys. Lett.* **24** (2007) 3168.
8. X H Deng and N H Liu, *Chin. Sci. Bull.* **53** (2008) 529.
9. X H Deng and N H Liu, *Appl. Phys.* **42** (2009) 045420.
10. Y H Chen, *Appl. Phys. Lett.* **92** (2008) 011925.
11. J A Monsoriu, R A Dwpine, and E Silvestre, *Eur. Opt. Soci.* **2** (2007) 07002.
12. N H Liu, S Y Zhu, and H Chen, *et al., Phys. Rev. E* **65** (2002) 046607.
13. S M Wang and L Gao, *Opt. Commun.* **267** (2006) 197.

