

s-roshan@tabrizu.ac.ir :

(دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۵/۲۴ ؛ پذیرش: ۱۳۹۲/۲/۲۲)

()

() ()
() ()

:

ضعیف [۷]، سیستم تک لایه‌ای آلاییده با اتم‌های دوترازی و سه ترازی [۸] و گاف نوارهای فوتونیک نامتقارن [۹]، مشاهده شده است.

در این مقاله سرعت انتشار پالس انعکاسی از یک بره آلاییده شده با اتم‌های دوترازی یا سه ترازی که در تماس با یک بلور فوتونی است مورد بررسی قرار می‌گیرد. نشان داده می‌شود که اگر فرکانس حامل پالس تابشی در محدوده گاف نوار فوتونی باشد و بره مورد نظر توسط اتم‌های دو ترازی (سه ترازی) آلاییده شود، انتشار پالس انعکاسی فرانوری (فرانوری) خواهد بود. در صورتی که اگر فرکانس حامل پالس تابشی در لبه گاف نوار فوتونی باشد و بره توسط اتم‌های دو ترازی (سه ترازی) آلاییده شود انتشار پالس انعکاسی فرانوری (فرانوری) خواهد بود.

بلورهای فوتونی به عنوان ساختارهای دی‌الکتریک متناوب توجه زیادی را در دو دهه اخیر به خود جلب کرده‌اند. خاصیت اصلی این ساختارها وجود گاف نوارهای فوتونی در آنها است. به طوری که امواج الکترومغناطیسی با فرکانسی در محدوده گاف نوار، مجاز به انتشار نبوده و میدان الکترومغناطیسی آنها میرا می‌شود [۱-۳]. با توجه به اینکه میدان میرا مشابه با تابع موج یک الکترون در داخل سد کوانتومی است، بلورهای فوتونی یک بعدی برای مطالعه زمان تونل‌زنی به عنوان سد اپتیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۴-۶]. نشان داده شده است که زمان تونل‌زنی یک پالس نوری از میان بلورهای فوتونی یک بعدی فرانوری است. اخیراً پالس‌های انعکاسی فرانوری در لایه دی‌الکتریک با جذب

با اعمال شرایط مرزی و با استفاده از روش ماتریس انتقال [۱۰]، می‌توان دامنه بازتاب $r(\omega)$ را برای هر یک از مؤلفه‌های فوریه پالس تابشی با استفاده از رابطه زیر به دست آورد:

$$r(\omega) = \frac{[x_{\tau\tau}(\omega) - n_s x_{\tau\tau}(\omega)] - i[n_s x_{\tau\tau}(\omega) + x_{\tau\tau}(\omega)]}{[x_{\tau\tau}(\omega) + n_s x_{\tau\tau}(\omega)] - i[n_s x_{\tau\tau}(\omega) - x_{\tau\tau}(\omega)]}, \quad (4)$$

که در آن $x_{ij}(\omega)$ ها بیانگر عناصر ماتریس انتقال کل ساختار است که دامنه‌های میدان را در ابتدای ساختار به دامنه‌های میدان در انتهای آن مربوط می‌کند و $n_s = 1$ ضریب شکست محیط اطراف ساختار مورد استفاده است. با استفاده از رابطه اخیر میدان الکتریکی پالس انعکاسی از ساختار عبارت می‌شود از:

$$E_r(\circ, t) = \int E_r(\circ, \omega) e^{-i\omega t} d\omega, \quad (5)$$

$$E_r(\circ, \omega) = E_i(\circ, \omega) r(\omega). \quad (6)$$

دامنه مؤلفه‌های فوریه پالس انعکاسی می‌باشد.

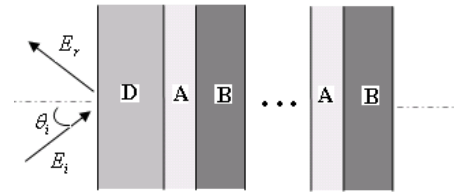
در این بررسی فرض شده است که پالس گاوسی فرودی دارای طیف بسیار باریکی است. تحت چنین شرایطی می‌توان زمان تأخیر گروه برای یک پالس انعکاسی را با زمان تأخیر قله این پالس T_r^{peak} تعریف کرد. به طوری که اگر زمان تأخیر گروه منفی باشد، یعنی $T_r^{\text{peak}} < 0$ ، انتشار پالس فرانوری (سرعت گروه بیشتر از سرعت نور در خلا)، و اگر زمان تأخیر گروه مثبت باشد، انتشار پالس فرونوری (سرعت گروه کمتر از سرعت نور در خلا) خواهد بود. از آنجایی که در این بررسی فرض شده است که بره مورد نظر با اتم‌های دوترازی یا سه‌ترازی آلییده شده است لذا تابع دی‌الکتریک بره آلییده شده عبارت می‌شود از:

$$\varepsilon(\omega) = n_B^2 + \chi(\omega), \quad (7)$$

که در آن پذیرفتاری حاصل از اتم‌های دو ترازی یا سه ترازی است. در حالت بره آلییده شده با اتم‌های دوترازی، پذیرفتاری خطی حاصل از اتم‌های دوترازی عبارت است از:

$$\chi(\omega) = -\frac{\Gamma}{\omega - \omega_0 + i\gamma}, \quad (8)$$

که در آن ω_0 فرکانس شدید اتم دوترازی است، Γ متناسب با قدرت نوسانگر بوده و به گشتاور دوقطبی گذار و چگالی اتم‌های دوترازی بستگی دارد، و γ پهنای خطی است. اما در



شکل ۱. ساختار هندسی به کار رفته که از یک بره دی‌الکتریک آلییده شده توسط اتم‌های دو ترازی یا سه ترازی با ضریب شکست پایه بره n_D و ضخامت آن d_D تشکیل شده است که در تماس با یک بلور فوتونیک با ساختار $(AB)^5$ متشکل از لایه‌هایی با ضرایب شکست n_B و n_A و ضخامت‌های d_B و d_A است.

آرایش هندسی مورد استفاده در این مقاله از یک بره دی‌الکتریک آلییده شده توسط اتم‌های دو ترازی یا سه ترازی تشکیل شده است که در تماس با یک بلور فوتونیک با ساختار $(AB)^5$ متشکل از لایه‌هایی با ضرایب شکست n_B و n_A و ضخامت‌های d_B و d_A است. ضریب شکست پایه بره $n_D = n_B$ و ضخامت آن d_D فرض می‌شود (به شکل ۱ مراجعه شود). روش‌های نظری مرسوم در مطالعه انتشار امواج در بلورهای فوتونیک یک بعدی عبارتند از: فرمول‌بندی مدل فلوکت-بلاخ، نظریه موج جفت شده و روش ماتریس انتقال.

ما در این مقاله با استفاده از روش اخیر تأثیر گاف نوار فوتونی را بر انتشار پالس انعکاسی از بره آلییده شده توسط اتم‌های دو ترازی و سه ترازی، بررسی می‌کنیم. فرض کنید در مکان $z = 0$ یک پالس گاوسی در جهت محور z عمود بر لایه‌های ساختار با فرکانس حامل ω_c ، دوام τ و میدان الکتریکی

$$E_i(\circ, t) = E_0 e^{-t^2/\tau^2}, \quad (1)$$

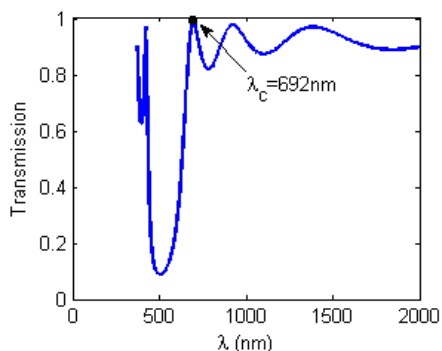
از سمت چپ به بره تابیده شود. برای بررسی رفتار زمانی پالس منعکس شده از ساختار ابتدا دامنه انعکاسی هر یک از مؤلفه‌های

فوریه پالس تابشی را به دست می‌آوریم. با توجه به رابطه

$$E(\circ, \omega) = \int E(\circ, t) e^{i\omega t} dt, \quad (2)$$

طیف فوریه پالس تابشی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$E_i(\circ, \omega) = \frac{\tau E_0}{\sqrt{\pi}} e^{-\tau^2(\omega - \omega_c)^2/4}. \quad (3)$$

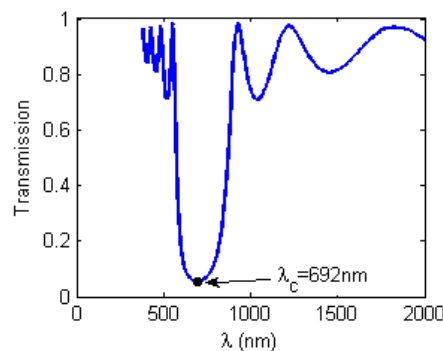


شکل ۳. عبور دهی بلور فوتونیک با پارامترهای $n_A = ۲/۲۲$ ، $n_B = ۱/۴۱$ ، $d_A = ۳۹ nm$ ، $d_B = ۱۲۲ nm$ که دارای گاف نوری با طول موج مرکزی $۵۰۰ nm$ است و طول موج $\lambda_c = ۶۹۲ nm$ در لبه گاف نوار فوتونی قرار دارد.

ضخامت اپتیکی لایه‌های سازنده آن $\lambda_c / ۴$ باشد. برای نشان دادن این گاف نوار، طیف عبوری بلور فوتونی با مشخصات $d_B = \frac{\lambda_c}{۴n_B} = ۱۲۲ nm$ ، $d_A = \frac{\lambda_c}{۴n_A} = ۷۸ nm$ ، $n_B = ۱/۴۱$ ، $n_A = ۲/۲۲$ در شکل ۲ رسم شده است.

ملاحظه می‌شود که فرکانس حامل پالس تابشی در میان گاف نوار این بلور فوتونیک قرار دارد. اما با انتخاب فرکانس حامل پالس تابشی را در لبه گاف نوار بلور فوتونیک قرار داد (شکل ۳).

در ادامه در شکل ۴ شدت میدان الکتریکی پالس‌های گاوسی تابشی و بازتابی از بره آلییده شده توسط اتم‌های دو تراز با ضخامت $d_D = \frac{\lambda_c}{۲n_D} = ۲۴۴ nm$ در هر دو حالت (۱) و (۲) برحسب زمان تأخیر رسم شده است. در اینجا منحنی نقطه‌چین نشانگر پالس تابشی، منحنی خط‌چین بیانگر پالس انعکاسی در حالت (۱) و منحنی پر نشان دهنده پالس انعکاسی در حالت (۲) است. با توجه به منحنی خط‌چین ملاحظه می‌شود که در حالت (۱) زمان تأخیر قله پالس انعکاسی منفی است، در واقع زمان تأخیر منفی نشان دهنده پالس انعکاسی فرانوری است. با این وجود وقتی فرکانس حامل پالس تابشی در لبه نوار فوتونی قرار می‌گیرد (حالت (۲))، زمان تأخیر قله پالس انعکاسی مثبت می‌شود که نشانگر فرانسوری بودن پالس انعکاسی است. در شکل ۵



شکل ۲. عبور دهی بلور فوتونیک با پارامترهای $n_A = ۲/۲۲$ ، $n_B = ۱/۴۱$ ، $d_A = ۷۸ nm$ ، $d_B = ۱۲۲ nm$ که دارای گاف نوری با طول موج مرکزی $\lambda_c = ۶۹۲ nm$ است.

حالت بره آلییده شده با اتم‌های سه تراز، پذیرفتاری خطی حاصل از اتم‌های سه تراز عبارت است از:

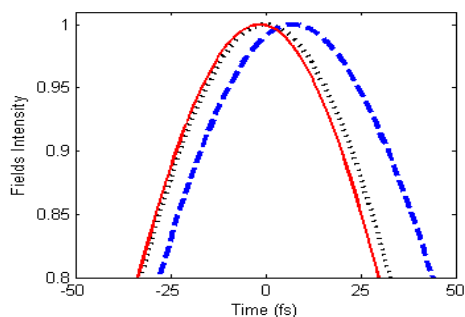
$$\chi(\omega) = \frac{\Gamma_1}{\omega - \omega_{e1} + i\gamma} + \frac{\Gamma_2}{\omega - \omega_{e2} + i\gamma}, \quad (9)$$

که در آن ω_{e1} ، ω_{e2} فرکانس‌های تشدید اتم سه تراز هستند طوری که $\omega_{e1} - \omega_{e2} = 2\Delta$ و Γ_1 و Γ_2 نیز متناسب با قدرت نوسانگرها هستند. در این بررسی برای سادگی فرض می‌کنیم $\Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma$.

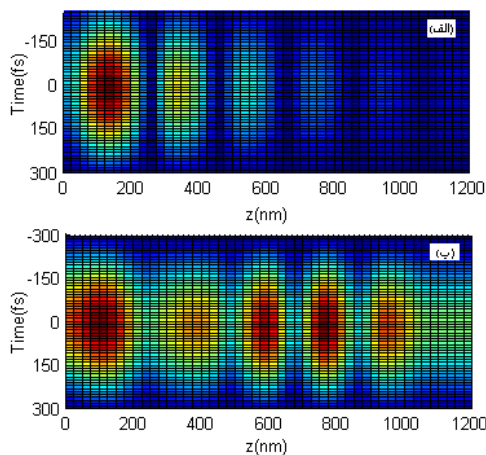
قبلاً در مرجع [۸] نشان داده شده است که پالس انعکاسی از یک بره دی الکتریک آلییده شده توسط اتم‌های دو تراز (سه تراز) در غیاب بلور فوتونیک، فرونوری (فرا نوری) است. در اینجا می‌خواهیم تأثیر گاف نوار فوتونیک بر سرعت انتشار پالس انعکاسی را بررسی کنیم. لذا دو حالت مختلف زیر را در نظر می‌گیریم:

(۱) فرکانس حامل پالس گاوسی در محدوده گاف نوار فوتونی قرار دارد.

(۲) فرکانس حامل پالس گاوسی در لبه گاف نوار فوتونی است. فرض می‌کنیم پالس گاوسی تابشی دارای فرکانس حامل $\omega_c = 2\pi c / \lambda_c$ ، طول موج حامل $\lambda_c = ۶۹۲ nm$ ، دوام $\tau = ۳۰\tau_c$ و $\tau_c = 2\pi / \omega_c$ باشد. از آنجایی که دوام این پالس در مقایسه با دوره آن بزرگ است، لذا دارای طیف بسیار باریکی خواهد بود. برای آنکه فرکانس حامل این پالس گاوسی در میان گاف نوار فوتونی قرار بگیرد می‌توان بلور فوتونی به کار برد که



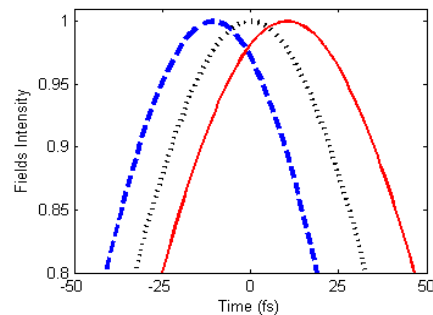
شکل ۵. شدت میدان الکتریکی پالس‌های تابشی و انعکاسی از برهه آلاینده توسط اتم‌های سه ترازی، در دو حالت (۱) و (۲). در اینجا منحنی نقطه‌چین نشان دهنده پالس فرودی، منحنی خط‌چین بیانگر پالس انعکاسی در حالت (۱) است (یعنی فرکانس حامل پالس گاوسی در محدوده گاف نوار فوتونی قرار دارد) و منحنی پر هم بیانگر پالس انعکاسی در حالت (۲) است (یعنی فرکانس حامل پالس گاوسی در لبه گاف نوار فوتونی است).



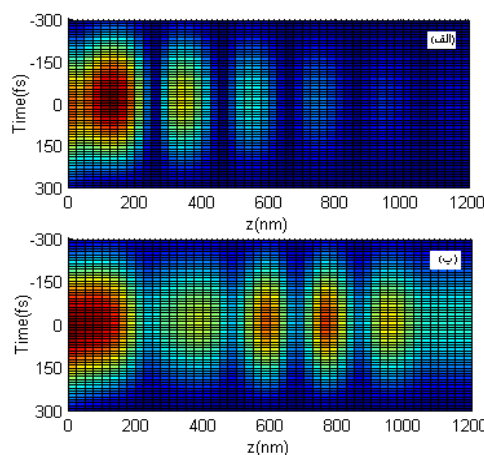
شکل ۷. تحول فضایی-زمانی میدان الکتریکی برهه آلاینده با اتم‌های سه ترازی در تماس با یک بلور فوتونی. (الف) فرکانس حامل پالس گاوسی در محدوده گاف نوار فوتونی قرار دارد. (ب) فرکانس حامل پالس گاوسی در لبه گاف نوار فوتونی است.

بوده پالس انعکاسی فرانوری منتشر می‌شود. بررسی تحولات فضایی-زمانی میدان الکتریکی پالس تابشی درون ساختار به کار رفته در هر دو حالت (۱) و (۲) نیز جالب توجه است.

تحول فضایی-زمانی میدان الکتریکی در هر دو حالت (۱) و (۲) برای برهه آلاینده توسط اتم‌های دو ترازی در شکل ۶ و برای برهه آلاینده توسط اتم‌های سه ترازی در شکل ۷ رسم شده است.



شکل ۴. شدت میدان الکتریکی پالس‌های تابشی و انعکاسی از برهه آلاینده شده توسط اتم‌های دو ترازی، در دو حالت (۱) و (۲). در اینجا منحنی نقطه‌چین نشان دهنده پالس فرودی، منحنی خط‌چین بیانگر پالس انعکاسی در حالت (۱) است (یعنی فرکانس حامل پالس گاوسی در محدوده گاف نوار فوتونی قرار دارد) و منحنی پر هم بیانگر پالس انعکاسی در حالت (۲) است (یعنی فرکانس حامل پالس گاوسی در لبه گاف نوار فوتونی است).



شکل ۶. تحول فضایی-زمانی میدان الکتریکی برهه آلاینده با اتم‌های دو ترازی در تماس با یک بلور فوتونی. (الف) فرکانس حامل پالس گاوسی در محدوده گاف نوار فوتونی قرار دارد. (ب) فرکانس حامل پالس گاوسی در لبه گاف نوار فوتونی است.

نیز زمان تأخیر قله پالس انعکاسی از برهه آلاینده شده توسط اتم‌های سه ترازی در دو حالت (۱) و (۲) نشان داده شده است.

با توجه منحنی خط‌چین ملاحظه می‌شود که در حالت (۱) زمان تأخیر قله پالس انعکاسی مثبت است، یعنی پالس انعکاسی فرونوری است.

اما در حالت (۲) یعنی وقتی که فرکانس حامل پالس تابشی در لبه نوار فوتونی قرار می‌گیرد زمان تأخیر قله پالس انعکاسی منفی

فرانوری (فرونوری) است. اما در وضعیتی که فرکانس حامل پالس انعکاسی در لبه نوار باشد، برای بره آلییده شده توسط اتم‌های دوترازی (سه ترازی) پالس انعکاسی فرونوری (فرانوری) خواهد بود. بنابراین این امکان وجود دارد که با استفاده از بلورهای فوتونی با گاف نوار قابل تنظیم [۱۱] سرعت انتشار پالس بازتابی از یک بره آلییده شده را کنترل کرد.

در این مقاله تأثیر گاف نوار فوتونی بر سرعت انتشار پالس انعکاسی در یک بره آلییده با اتم‌های دوترازی یا سه‌ترازی مورد مطالعه قرار گرفت، به طوری که این بره ما بین خلاء و یک بلور فوتونی قرار داشت. نشان دادیم که وقتی فرکانس حامل پالس فرودی در داخل گاف نوار فوتونی قرار گیرد انتشار پالس انعکاسی از بره آلییده شده توسط اتم‌های دوترازی (سه ترازی)

1. S G Johnson and J D Joannopoulos, "Introduction to Photonic Crystals: Bloch's Theorem, Band Diagrams, and Gaps (But No Defects)", MIT. (2003); <http://ab-initio.mit.edu/photons/tutorial/photonic-intro.pdf>.
2. J D Joannopoulos, J N Winn, and R D Mead, "Photonic Crystals: Molding the Flow of Light", Princeton University Press (1995).
3. P Yeh, A Yarive, and C S Hong, *J. Opt. Soc. Am.* **67** (1977) 42.
4. A M Steinberg, P G Kwiat, and R Y Chiao, *Phys. Rev. Lett.* **71** (1993) 708.
5. C Spielmann, R Szipocs, A Stingl, and F Krausz, *Phys. Rev. Lett.* **73** (1994) 2308.
6. A M Steinberg and R Y Chiao, *Phys. Rev. A* **51** (1995) 3525.
7. L G Wang and S Y Zhu, *Optics Letters* **31** (2006) 2223.
8. L G Wang, H Chen, and S Y Zhu, *Phys. Rev. E* **70** (2004) 066602.
9. S Longhi, *Phys. Rev. E* **64** (2001) 037601.
10. N H Liu, S Y Zhu, H Chen, and X Wu, *Phys. Rev. E* **65** (2002) 046607.
11. Y Saado, M Golosovsky, D Davidov, and A Frenkel, *Phys. Rev. B* **66** (2002) 195108.