

## طراحی ساختار بلور فوتونی چرپ شده برای آشکارساز مادون قرمز چندرنگ کوک پذیر

علیرضا مبینی<sup>۱</sup>، وحید احمدی<sup>۲</sup>

### چکیده

در این مقاله ساختار بلور فوتونی چرپ شده برای آشکارساز مادون قرمز چندرنگ کوک پذیر طراحی می شود. با استفاده از روش ماتریس انتقال (TMM) پاسخ طیف جذب در ساختار بلور فوتونی نقص دار تحت تأثیر پارامترهای ساختاری مختلف مانند تعداد، جنس و ضخامت لایه های بالا و پایین نقص و ضخامت خود لایه نقص مورد بررسی قرار می گیرد. اثر لایه نوار بلور فوتونی روی طیف جذب آشکارساز مادون قرمز بررسی، و افزایش ضریب جذب تا ۹۶٪ برای این ساختار بدست می آید. همچنین اثرات پارامترهای ساختاری مختلف مانند جنس، ضخامت لایه های کناری و مرکزی و نیز اثر تقارن لایه های کناری در محل و شدت بیشینه ها در ساختار بلور فوتونی چرپ شده بررسی می شود. با افزایش تعداد لایه های کناری تا ۳۱ لایه اثرات فیلتری زیاد شده و تعداد بیشینه های جذب به ۷ عدد می رسد. در این حالت مقدار FWHM به ۳۶ نانومتر و فاصله بیشینه ها از هم تا ۱۷۱ نانومتر کاهش می یابد. با استفاده از این نتایج محل بیشینه طول موج جذب در ساختار بلور فوتونی چرپ شده با دقت ۴۸ نانومتر تنظیم می شود.

### کلیدواژه

آشکارساز مادون قرمز، بلور فوتونی، جذب چندرنگ، چرپ شدگی، روش ماتریس انتقال (TMM).

### مقدمه

را بوجود می آورد [۷]. از مودهای لبه ای منتج از این نوارها که دارای اثرات سرعت گروه پایین هستند برای تغییر در بهره لیزری و بهره جذب لایه فعال استفاده می شود [۸]. تحقیقات زیادی در مورد مشخصات ساختارهای بلور فوتونی با PBG که منجر به لیزرهایی با توان آستانه پایین می شوند، در مراجع مختلف گزارش شده است [۸ و ۹]. همچنین تغییرات بهره جذب تحت اثر بلور فوتونی دو بعدی نیز در مراجعی مورد بحث قرار گرفته است [۱۰ و ۱۱].

از روش های متعددی مانند روش تفاضل متناهی در حوزه زمان<sup>۵</sup> (FDTD)، روش تفاضل متناهی در حوزه فرکانس<sup>۶</sup> (FDFD)، بسط امواج تخت<sup>۷</sup> (PWE) و روش ماتریس انتقال<sup>۸</sup> (TMM) برای بررسی انتشار نور در ساختار بلور فوتونی استفاده می شود [۱۵-۱۲]. روش ماتریس انتقال که در این مقاله استفاده می شود، روش شناخته شده ای برای حل معادلات

آشکارسازهای مادون قرمز دارای کاربردهای صنعتی و فناوری زیادی هستند. کاربردهای معمول آنها شامل پایش محیط [۱] و [۲]، تشخیص شیمیایی و بیولوژیکی ترکیبات [۳]، حسگرهای تصویربرداری حرارتی، دید در شب و تشخیص ناهنجاری است [۴-۶]. آشکارسازهای مادون قرمز سال های زیادی است که مورد توجه و مطالعه قرار گرفته اند و اثرات و ساختارهای مختلفی مانند امواج پلاسمون سطحی<sup>۳</sup> (SPP)، بلور فوتونی و آرایه نوارهای فلزی با ابعاد زیر طول موجی برای تغییر مشخصات آنها استفاده شده است. از میان آنها، بلور فوتونی با ساختاری متناوب از مواد دی الکتریک متفاوت باعث تغییر مود های منتشر شونده در ساختار شده و گاف نوار فوتونی<sup>۴</sup> (PBG)

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی برق الکترونیک، دانشگاه تربیت مدرس  
<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، v\_ahmadi@modares.ac.ir  
<sup>۳</sup> Surface Plasmon Polariton  
<sup>۴</sup> Photonic Band Gap  
تاریخ دریافت: ۲۹ مهر ۱۳۹۲ تاریخ پذیرش: ۱۲ خرداد ۱۳۹۳

<sup>۵</sup> Finite Difference Time Domain  
<sup>۶</sup> Finite Difference Frequency Domain  
<sup>۷</sup> Plane Wave Expansion  
<sup>۸</sup> Transfer Matrix Method

$$E(z, \omega) = E_i e^{ik \cdot z} + E_r e^{-ik \cdot z} \quad (1)$$

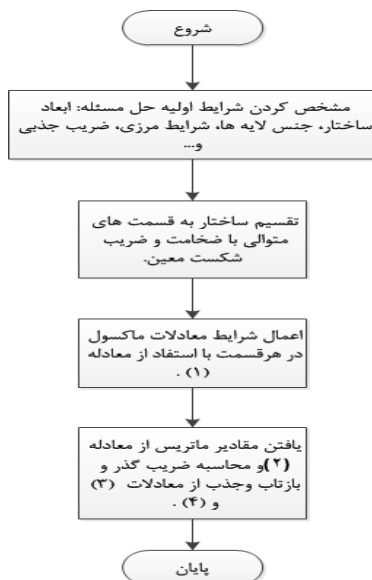
در ادامه ساختار را به  $N$  بخش مجزا تقسیم کرده و شرایط مرزی معادلات ماکسول را برای هر بخش در نظر می‌گیریم. مطابق این روش برای حرکت بین هر دو قسمت مجاور، دو ماتریس  $P_i$  و  $I_i$  وارد محاسبات می‌شود: برای انتشار موج در هر قسمت بعنوان یک محیط پیوسته و  $I_i$  برای انتقال موج در مرز دو قسمت مجاور. در نهایت ماتریس انتقال کل  $M$  از معادله زیر بدست می‌آید که برحسب ماتریس‌های  $P_i$  و  $I_i$  نوشته می‌شود.

$$M = I_{2n+1} \prod_{i=1}^{2n} P_i I_i \quad (2)$$

ضریب جذب در ساختار از روی تفاضل ضریب گذر  $T$  و ضریب بازتاب  $R$  از توان کل ورودی محاسبه می‌شود. ضرایب  $R$  و  $T$  از رابطه‌های زیر بدست می‌آیند در این رابطه‌ها  $M_{ij}$  درایه‌های ماتریس  $M$  هستند.

$$T = |M_{11} - M_{12} M_{21} / M_{22}|^2 \quad (3)$$

$$R = |M_{21} / M_{22}|^2 \quad (4)$$



شکل ۱. روند نامی برنامه کامپیوتری برای شبیه‌سازی ساختار به روش ماتریس انتقال.

در شکل ۱، روند نامی برنامه کامپیوتری نوشته شده آمده‌است.

ماکسول در ساختارهای یک بعدی است. TMM با روش‌هایی دیگری مانند FDTD و FDFD مقایسه شده‌است. مقایسه‌ها نشان می‌دهد سازگاری خوبی بین نتایج این روش و نتایج آزمایش برای ساختارهای یک بعدی وجود دارد و تفاوت اندک به علت شرایط فیزیکی مسئله است [۱۶].

در این مقاله از ساختار چندلایه متناوب از مواد دی‌الکتریک که بعنوان بلور فوتونی یک بعدی شناخته می‌شود برای طراحی آشکارساز مادون قرمز استفاده می‌شود. پارامترهای ساختاری مانند ضخامت و ضریب شکست لایه غیر فعال، تعداد لایه‌های بالا و پایین لایه فعال و ضخامت لایه نقص بطور کامل و دسته‌بندی شده مورد بررسی قرار گرفته و از نتایج بدست‌آمده برای تنظیم محل دقیق پاسخ جذب در گستره مادون قرمز استفاده می‌شود. این بررسی‌های دسته‌بندی شده نتایج مفیدی را به دست طراحان برای طراحی آشکارسازهای مادون قرمز با کارایی بالاتر می‌دهد. در نهایت با وارد کردن نقص تنظیم شده در ساختار به ضریب جذب افزایش یافته‌ای تا ۹۶٪ دست می‌یابیم. همچنین ساختار بلور فوتونی چرپ‌شده با مطالعه اثر پارامترهای ساختاری مانند ضخامت و جنس لایه مرکزی، تعداد و محل قرارگیری لایه‌های تشکیل‌دهنده بررسی شده و ساختاری برای طراحی آشکارساز مادون قرمز چندرنگ طراحی می‌شود که تاکنون (بر اساس اطلاعات موجود) بررسی نشده‌است.

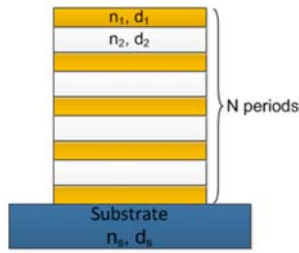
ادامه مقاله بصورت زیر تنظیم شده‌است: در بخش دوم به توضیح روش شبیه‌سازی بکاررفته در این مقاله می‌پردازیم. در بخش سوم پارامترهای مختلف ساختار نقص دار برای تنظیم بیشینه جذب بررسی شده و از ساختار بلور فوتونی چرپ‌شده برای طراحی آشکارسازهای مادون قرمز چند رنگ استفاده می‌کنیم.

## روش شبیه‌سازی

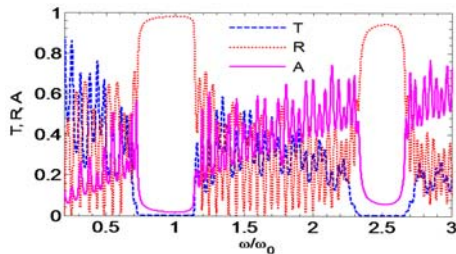
روش ماتریس انتقال روش شناخته‌شده‌ای برای بررسی انتشار امواج الکترومغناطیسی در بلور فوتونی یک بعدی می‌باشد. ما از این روش برای محاسبه ضریب‌های پراکنش یعنی ضریب گذر، ضریب بازتاب و ضریب جذب در آشکارسازهای مادون قرمز مبتنی بر بلور فوتونی استفاده می‌کنیم. در این روش میدان الکتریکی در ساختار بصورت جمع دو مولفه گذر و بازتاب مطابق معادله زیر در نظر گرفته می‌شود [۱۸-۱۶].

## نتایج شبیه‌سازی و بحث

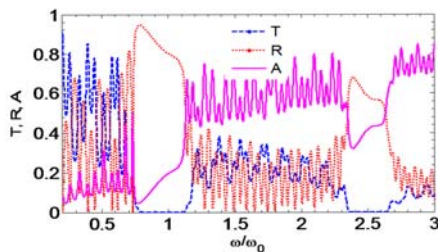
## بلور فوتونی یک بعدی



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲. الف) نمای ساختار بلور فوتونی بکاررفته برای آشکارساز مادون قرمز. ب) ضرایب گذر، بازتاب و جذب برای بلور فوتونی یک بعدی برای آشکارساز مادون قرمز با ساختار  $S_1$  یعنی  $n_1=3.55+i0.035$  و  $n_2=1.7$  (ج) ضرایب گذر، بازتاب و جذب برای بلور فوتونی یک بعدی برای آشکارساز مادون قرمز با ساختار  $S_2$  یعنی  $n_1=3.55+i0.035$  و  $n_2=5.5$

همانطور که از مقایسه این شکل‌ها دیده می‌شود سه ضریب گذر، بازتاب و جذب وابسته به هم تغییر می‌کنند. یعنی در محدوده فرکانسی که یکی از ضرایب افزایش یا کاهش پیدا کند دو ضریب دیگر به ترتیب کاهش یا افزایش می‌یابند. مثلاً برای  $n_2=5.5$  در بازه  $1.12\omega_0 \leq \omega \leq 2.3\omega_0$  که ضریب جذب افزایش یافته است دو ضریب گذر و بازتاب کاهش یافته است و یا در بازه  $0.7\omega_0 \leq \omega \leq 1.1\omega_0$  که ضریب بازتاب افزایش می‌یابد دو ضریب جذب و گذر کاهش می‌یابد. به همین ترتیب برای  $n_2=1.7$  در بازه  $0.73\omega_0 \leq \omega \leq 1.1\omega_0$  که ضریب بازتاب افزایش می‌یابد دو ضریب جذب و گذر کاهش می‌یابد. از طرفی در ساختار  $S_2$  با کاهش نسبت ضریب شکست لایه‌های متوالی نسبت به ساختار  $S_1$ ، قدرت آینه براگ کاهش می‌یابد و ضریب بازتاب در فرکانس‌های بالا کمتر می‌شود که این موجب افزایش

نمای بلور فوتونی یک بعدی که از تناوب  $N$  لایه متفاوت دی-الکتریک ساخته شده است در شکل ۲- الف نمایش داده شده است. لایه‌ها دارای مقادیر ضریب شکست  $n_1$  و  $n_2$  و ضخامت  $d_1$  و  $d_2$  هستند بطوریکه ضخامت کل ساختار برابر  $N(d_1+d_2)+d_s$  می‌باشد که در آن  $d_s$  ضخامت زیرلایه است. ضخامت هر لایه ساختار برای هر طول موج معین در گستره مادون قرمز از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$d_i = \frac{\lambda_0}{4 \times n_i} \quad (5)$$

طول موج مینا برابر ۳ میکرومتر برای طیف مادون قرمز میانی در نظر گرفته می‌شود. مقادیر ضخامت‌ها می‌تواند مضرری از ضخامت محاسبه شده از رابطه ۵ باشد ولی این مقدار باید آن-قدر کوچک باشد که موج وارد شده به ساختار که درگستره مادون قرمز میانی است تغییرات تناوبی ضرایب شکست را ببیند و نیز حجم محاسبات افزایش پیدا نکند. اثر جفت‌شدگی نور از ناحیه منبع ورودی (هوا در این شبیه‌سازی) به ساختار و نیز جفت‌شدگی نور از ساختار به محیط بیرون در شبیه‌سازی با دو ماتریس  $P_0$  و  $P_n$  در نظر گرفته می‌شود.

## طیف جذب مادون قرمز بلور فوتونی یک بعدی

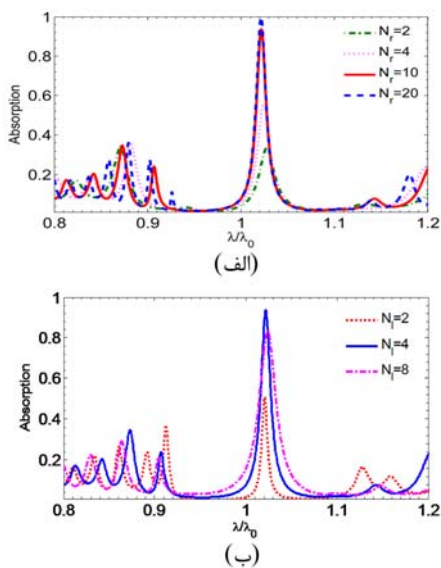
وقتی ماده جاذب (لایه‌های زرد رنگ در شکل ۲- الف وارد ساختار شود، بخش موهومی ضریب شکست متناظر باعث جذب نور ورودی در داخل ساختار می‌شود. شبیه‌سازی برای دو ساختار با ضریب شکست‌های متفاوت انجام می‌شود.

در ساختار اول ( $S_1$ )، لایه غیرجاذب دارای ضریب شکستی کوچکتر از ضریب شکست لایه جاذب است، یعنی  $n_1=3.55+i0.035$  و  $n_2=1.7$  و در ساختار دوم ( $S_2$ )، لایه غیرجاذب دارای ضریب شکستی بزرگتر از ضریب شکست لایه جاذب است، یعنی  $n_1=3.55+i0.035$  و  $n_2=5.5$  برای این دو ساختار سه ضریب گذر، بازتاب و جذب محاسبه و در شکل‌های ۲- ب و ۲- ج رسم شده است.

جدول ۱. پارامترها و مقادیر کمینه و بیشینه آنها که در این شبیه‌سازی بکار می‌روند.

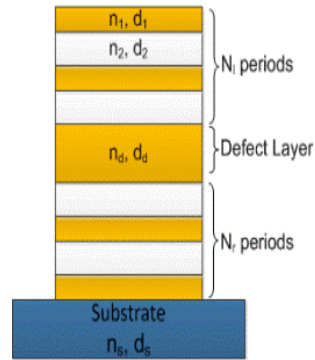
نشانه	کمیت	مقدار کمینه	مقدار بیشینه
$n_2$	ضریب شکست لایه غیرجاذب	۲	۵/۵
$N_I$	تعداد لایه‌های بالای لایه نقص	۲	۸
$N_r$	تعداد لایه‌های پایین لایه نقص	۲	۲۰
$t_d$	ضخامت لایه نقص	$300\text{nm}$	$1500\text{nm}$
$d_2$	ضخامت لایه غیرجاذب	$136\text{nm}$ برای $n_2=5.5$	$441\text{nm}$ برای $n_2=1.7$
$d_1$	ضخامت لایه جاذب	$211\text{nm}$ ثابت	$211\text{nm}$ ثابت

دامنه بیشینه جذب کاهش می‌یابد، زیرا نور ورودی به راحتی از محل نقص در ساختار خارج شده و به زیر لایه می‌رود و بنابراین جذب کاهش می‌یابد. برای مقادیر بزرگ  $N_r$  نور به شدت در داخل ساختار و در محل نقص متمرکز می‌شود و جذب افزایش می‌یابد تا اینکه برای مقدار  $N_r=20$  جذب به بیشینه خود می‌رسد و دیگر نیازی به افزایش این پارامتر نیست. برای ادامه کار مقدار  $N_r=10$  در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۴. الف) پاسخ جذب بلور فوتونی برای آشکارساز مادون قرمز برای تعداد مختلف لایه‌های پایین لایه نقص و  $N_I=4$  ب) پاسخ جذب بلور فوتونی برای آشکارساز مادون قرمز برای تعداد مختلف لایه‌های بالای لایه نقص و  $N_r=10$ .

ضریب جذب در این فرکانس‌ها برای ساختار  $R_2$  می‌شود. فرکانس‌های پایین گاف مقدار طول موج افزایش یافته و نور ورودی تناوب موجود در ساختار را کمتر می‌بیند در نتیجه اثر براگ کمتر خود را نشان می‌دهد و ضریب عبور افزایش می‌یابد.



شکل ۳. نمای ساختار بلور فوتونی نقص‌دار برای آشکارساز مادون قرمز لایه نقص از جنس ماده جاذب انتخاب شده‌است.

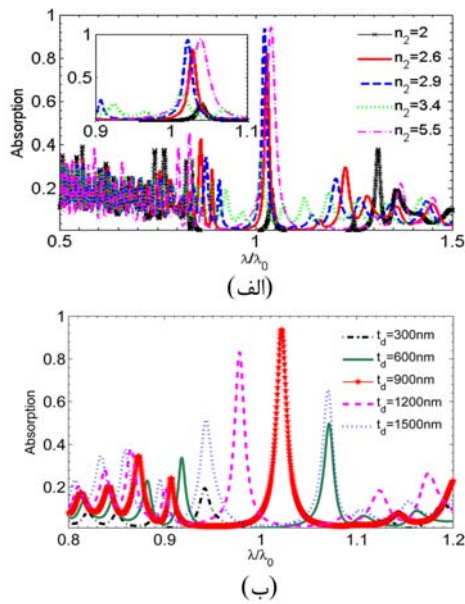
### طیف جذب مادون قرمز بلور فوتونی یک بعدی با نقص

برای تنظیم دقیق محل بیشینه پاسخ جذب در گستره مادون قرمز در طول موج‌های مشخص نقص وارد ساختار بلور فوتونی می‌شود [۱۹ و ۲۰]. نمای ساختار بلور فوتونی نقص‌دار در شکل ۳ نشان داده شده‌است. لایه نقص از جنس ماده جاذب انتخاب می‌شود. در این ساختار با اضافه کردن لایه نقص در مقایسه با شکل‌های ۲-ب و ۲-ج، گاف موجود در ضریب جذب در حوالی طول موج مینا از بین می‌رود و مودهای جذبی جدیدی بوجود می‌آید که با تغییر ساختار آشکارساز تغییر می‌کنند. با استفاده از این ویژگی اثر پارامترهای ساختاری مختلفی مانند ضریب شکست و ضخامت لایه غیرجاذب، تعداد لایه‌های بالا و پایین لایه نقص و ضخامت آنها بطور منظم، برای طراحی آشکارسازی با بیشینه جذب تنظیم شده بررسی می‌شود. این محدوده از پارامترهای طراحی به طراحان اجازه می‌دهد تا محل دقیق بیشینه جذب را برای کاربردهای مختلف تنظیم نمایند. این پارامترها و مقادیر کمینه و بیشینه آنها که در این شبیه‌سازی بکار می‌رود در جدول ۱. نشان داده شده‌است.

### تغییر تعداد لایه‌های پایین لایه نقص

اثر تغییر تعداد لایه‌ها پایینی که در زیر لایه نقص قرار دارند، در پاسخ جذب در شکل ۴-الف نشان داده شده‌است. آن گونه که در این شکل مشاهده می‌شود برای مقادیر کوچک  $N_r$  مقدار

## تغییر تعداد لایه‌های بالای لایه نقص



شکل ۵. الف) پاسخ جذب بلور فوتونی برای آشکارساز مادون قرمز برای مقادیر مختلف ضریب شکست لایه غیرجاذب و ب) پاسخ جذب بلور فوتونی برای آشکارساز مادون قرمز برای مقادیر مختلف ضخامت لایه نقص.

مشخص اتفاق نیفتد. در این شبیه‌سازی مقدار این پارامتر از ۳۰۰ نانومتر تا ۱۵۰۰ نانومتر بطور منظم تغییر می‌کند. همانطور که از شکل ۵-ب مشخص است در مقدار ۳۰۰ نانومتر یک مود نقص با دامنه ضعیف وجود دارد. وقتی مقدار ضخامت لایه نقص افزایش پیدا می‌کند مقدار دامنه جذب نیز زیاد می‌شود، تا اینکه در ۹۰۰ نانومتر یک مود نقص قوی در ساختار بلور فوتونی نقص دار منجر به جذب قوی در این مود می‌شود که در شکل با رنگ قرمز نمایش داده شده است. با دور شدن از این مقدار دوباره مقدار دامنه جذب در محل بیشینه کاهش پیدا می‌کند و سرانجام این بیشینه محو می‌شود.

### بلور فوتونی چرپ‌شده برای آشکارساز مادون قرمز چندرنگ

نمای ساختار بلور فوتونی چرپ‌شده در شکل ۶-الف آمده است. در این ساختار هر لایه دارای ضخامتی است که از معادله زیر بدست می‌آید [۲۱-۲۲]

$$d_n = 0.5 \times d_c (\sqrt{n} - \sqrt{n-1}) \quad (6)$$

که در آن  $d_c$  ضخامت لایه مرکزی و  $n$  شماره لایه است.

اثر تغییر تعداد لایه‌هایی که در بالای لایه جاذب نقص و در مسیر نور ورودی قرار می‌گیرد در پاسخ جذب در شکل ۴-ب نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود مقدار بیشینه دامنه وقتی تعداد لایه‌های بالایی کم باشند کاهش می‌یابد، زیرا با کاهش تعداد این لایه‌ها اثر پراکنش براگ کم می‌شود. از طرفی وقتی تعداد این لایه‌ها خیلی زیاد می‌شود مانند  $N_I = 8$ ، نور ورودی به شدت بازتاب شده و وارد ساختار نمی‌شود و به لایه جاذب نمی‌رسد و نسبت به حالت  $N_I = 4$  بیشینه جذب کاهش پیدا می‌کند. بنابراین سازوکاری بین قدرت آینه‌های براگ ورودی و میزان توان نور ورودی به ساختار که به ماده جاذب در محل نقص می‌رسد، وجود دارد و باید مقدار مناسبی برای تعداد لایه‌ها انتخاب شود. مقدار  $N_I = 4$  یک مقدار مناسب برای این پارامتر است و همانطور که در شکل ۴-ب با رنگ آبی مشخص شده است برای این مقدار بیشینه جذب به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

## تغییر ضریب شکست ماده غیر جاذب

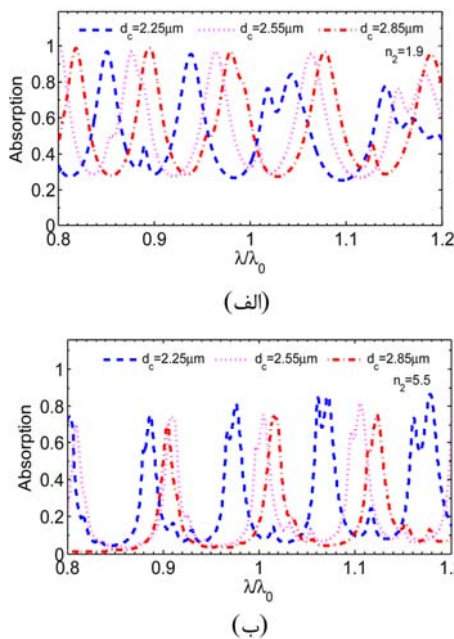
اثر تغییر پارامتر ضریب شکست لایه غیرجاذب یعنی  $n_2$  در پاسخ جذب آشکارساز در شکل ۵-الف نشان داده شده است. مقدار این پارامتر از ۲ تا ۵/۵ بتدریج تغییر داده می‌شود. برای مقدار ۲ هیچ بیشینه جذب قابل توجهی در پاسخ وجود ندارد و برای مقدار ۲/۶ یک بیشینه در پاسخ ظاهر می‌شود. با افزایش مقدار  $n_2$  این بیشینه به سمت طول‌موج‌های کمتر جابجا می‌شود تا اینکه نهایتاً در مقدار  $n_2 = 3.4$  از بین می‌رود و بیشینه دیگری در طول‌موج بزرگتری خود را نشان می‌دهد که با افزایش  $n_2$  به مقادیری بزرگتر از  $n_1$  به بیشینه غالب تبدیل می‌شود. در شکل برای مقدار  $n_2 = 5.5$  این بیشینه با رنگ صورتی قابل مشاهده است.

## تغییر ضخامت لایه نقص

پارامتر مهم دیگر در طراحی بلور فوتونی با نقص برای آشکارساز مادون قرمز، ضخامت لایه نقص  $d_d$  است که اثر تغییر آن در شکل ۵-ب نشان داده شده است. بطور کلی در بلور فوتونی وقتی ضخامت لایه نقص زیاد می‌شود جذب افزایش پیدا می‌کند اما ممکن است که جذب در طول‌موج دلخواه برای کاربرد

بیشتر را نشان می‌دهد. برای مقدار  $n_2=3$  محل بیشینه‌های جذب در حال جابجا شدن بین دو حالت  $n_2=1.9$  و  $n_2=5.5$  هستند. از این جابجایی در محل بیشینه‌ها می‌توان برای تنظیم دقیق محل طول موج‌های جذبی آشکارساز با انتخاب مناسب برای مقدار  $n_2$  استفاده کرد.

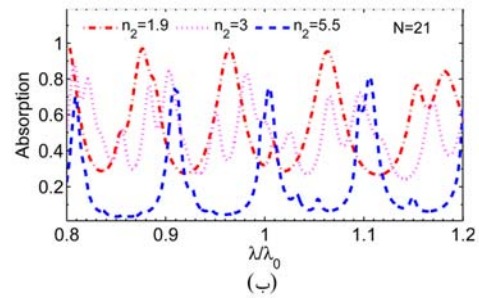
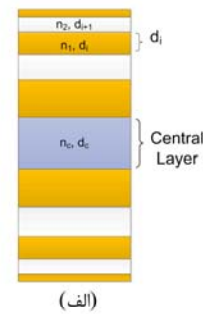
اثر تغییر ضخامت لایه مرکزی یعنی  $d_c$  روی طیف جذب در شکل ۷-الف و ۷-ب برای دو مقدار  $n_2=1.9$  و  $n_2=5.5$  نشان داده شده است. آنطور که در شکل ۷-الف مشاهده می‌شود برای مقدار  $n_2=1.9$  با کاهش ضخامت لایه مرکزی یک جابجایی آبی، در بیشینه جذب بوجود می‌آید که قابلیت تنظیم طول موج تا حدود ۴۸ نانومتر را فراهم می‌کند. برای مقدار  $n_2=5.5$  آنطور که در شکل ۷-ب مشاهده می‌شود برای طول موج‌های بیشتر از طول موج مبنا روند قبلی حفظ شده و با کاهش ضخامت لایه مرکزی بیشینه جذب دارای جابجایی آبی است ولی برای طول موج‌های زیر طول موج مبنا این روند حفظ نمی‌شود. قابل توجه است که مقدار پارامترهای  $K_a$  و  $FWHM$  با تغییر این پارامتر تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کنند. بنابراین با استفاده از این نتایج



شکل ۷. پاسخ جذب بلور فوتونی چرپ‌شده برای آشکارساز مادون قرمز چندرنگ برای ضخامت‌های مختلف لایه مرکزی برای الف)  $n_2=1.9$  و ب)  $n_2=5.5$ .

می‌توان با تغییر  $d_c$  طول موج جذبی را در مقدار معین دلخواه بخوبی تنظیم کرد.

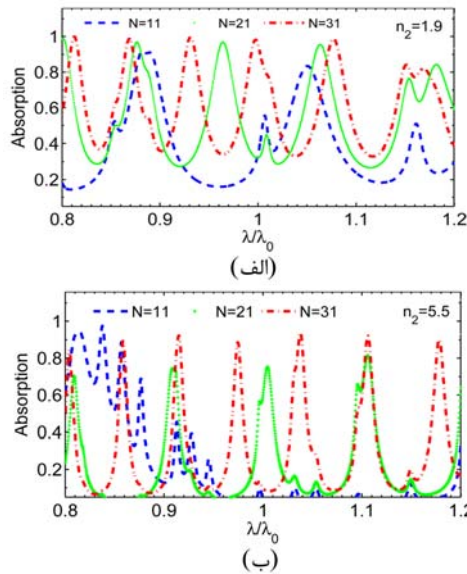
پارامتر دیگر مربوط به لایه مرکزی ضریب شکست آن است که اثر تغییر آن در طیف جذب در شکل ۸. بررسی شده است.



شکل ۶. الف) نمای ساختار بلور فوتونی چرپ‌شده برای آشکارساز مادون قرمز چند رنگ و ب) پاسخ جذب بلور فوتونی چرپ‌شده برای آشکارساز مادون قرمز چند رنگ برای سه مقدار  $n_2=1.9$ ،  $n_2=3$  و  $n_2=5.5$ .

تاکنون با استفاده از ساختار چرپ‌شده فیلترهای باند باریک با فرکانس‌های عبوری مشخص طراحی شده است. فرکانس‌های عبوری فیلتر از طریق تغییر پارامترهای ساختاری تنظیم می‌شوند [۲۳]. در این جا، با استفاده از ویژگی موده‌های چندگانه، ساختاری برای آشکارساز مادون قرمز چندرنگ طراحی می‌کنیم. مقدار ضریب شکست لایه جذب برابر مقدار قبلی  $n_1=3.55+i0.035$  و مقدار ضریب شکست لایه مرکزی برابر  $n_2$  و ضخامت آن برابر  $2/55$  میکرومتر در نظر گرفته می‌شود. تعداد لایه‌ها در هر طرف لایه مرکزی برابر  $N$  است. با استفاده از این پارامترها وابستگی طیف جذبی به مقدار پارامترهای ساختاری بررسی می‌شود. شکل ۶-ب ضریب جذب برای مقادیر مختلف ضریب شکست لایه غیر جذب را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود برای  $n_2=1.9$  و  $n_2=5.5$  مقادیر بیشینه جذب به ترتیب حدود  $0.07$  و  $0.96$  می‌باشد، اما در مقابل نسبت مقدار ضریب جذب در طول موج‌های جذب شده به مقدار ضریب جذب در طول موج‌های جذب نشده ( $K_a$ )، به ترتیب برابر  $3/3$  و  $11/5$  است. همچنین مقدار پهنای کامل در نصف بیشینه  $FWHM$ <sup>۹</sup> از مقدار  $150$  نانومتر به مقدار  $60$  نانومتر در  $n_2=5.5$  کاهش می‌یابد که امکان جذب با طیف انتخاب پذیری

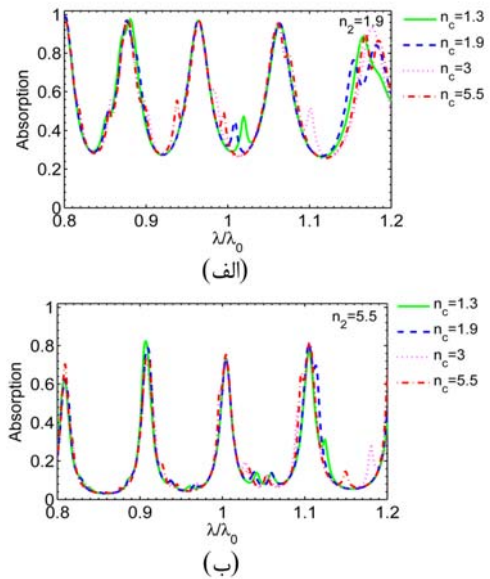
<sup>۹</sup> Full Width at Half Maximum



شکل ۹. پاسخ جذب بلور فوتونی چرپ شده برای آشکارساز مادون قرمز چند رنگ برای تعداد لایه‌های کناری مختلف برای الف)  $n_2=1.9$  و ب)  $n_2=5.5$ .

است. در این حالت مقدار  $FWHM$  به ۳۶ نانومتر می‌رسد و فاصله بیشینه‌ها از هم تا ۱۷۱ نانومتر کاهش می‌یابد. ضریب  $K_a$  در این حالت برابر ۱۳/۴ است. برای مقدار  $n_2=1.9$  نیز روند مشابهی وجود دارد. بطوریکه با افزایش مقدار تا  $N=31$  تعداد بیشینه‌ها در گستره ۰/۸ تا ۱/۲ برابر طول موج مینا به ۶ بیشینه می‌رسد. فاصله بیشینه‌ها تا ۱۸۰ نانومتر کاهش می‌یابد و  $FWHM$  آنها به ۱۲۹ نانومتر می‌رسد و ضریب  $K_a$  برابر ۲/۵۸ است. در  $N=21$  مقدار  $FWHM$  تقریباً تغییری نکرده و ضریب  $K_a$  برابر ۳/۵ می‌شود. البته در مقایسه با شکل ۹-ب، برای مقدار  $N=11$  همچنان دو بیشینه در طیف جذب وجود دارد که ناشی از نسبت بزرگتر ضریب شکست‌های دو لایه متوالی در این حالت است.

شکل ۱۰. ضریب جذب را برای ساختار بلور فوتونی چرپ شده متقارن و غیرمتقارن با دو مقدار  $n_2=1.9$  و  $n_2=5.5$  نمایش می‌دهد. همانطور که از شکل ۶-الف مشخص است در ساختار متقارن لایه‌های بالا و پایین لایه مرکزی از نظر جنس، ضخامت و محل قرارگیری کاملاً یکسان هستند، در حالیکه در ساختار غیر متقارن لایه‌های بالای لایه مرکزی مانند شکل ۶-الف هستند ولی در لایه‌های زیر لایه مرکزی جای لایه  $n_1$  و  $n_2$  عوض می‌شود بطوریکه اولین لایه در زیر لایه مرکزی لایه سفید رنگ یعنی  $n_2$  و لایه بعدی لایه زرد رنگ و به همین



شکل ۸. پاسخ جذب بلور فوتونی چرپ شده برای آشکارساز مادون قرمز چندرنگ برای ضریب شکست‌های مختلف لایه مرکزی برای الف)  $n_2=1.9$  و ب)  $n_2=5.5$ .

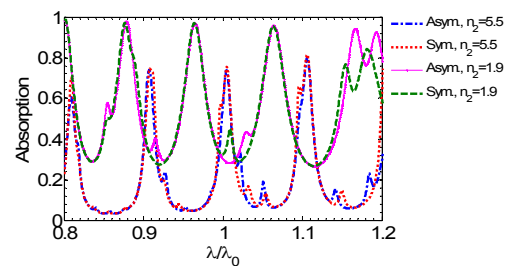
همانطور که از شکل ۸-الف مشخص است تغییر مقدار  $n_c$  در محدوده ۱/۳ تا ۵/۵ بجز در طول موج نزدیک ۱/۱۷ برابر طول موج مینا تأثیر چندانی روی طیف جذب ندارد. همین مطلب برای  $n_2=5.5$  نیز در شکل ۸-ب مشاهده می‌شود. بنابراین تنها پارامتر مربوط به ضخامت لایه مرکزی که روی طیف جذب موثر است،  $d_c$  می‌باشد.

پارامتر مهم دیگر در طراحی این ساختار تعداد لایه‌هایی است که در دو طرف لایه مرکزی قرار می‌گیرند. اثر تغییر این پارامتر ( $N$ )، روی طیف جذب در شکل ۹-الف و ۹-ب برای دو مقدار  $n_2=1.9$  و  $n_2=5.5$  نشان داده شده است. تعداد این لایه‌ها اثرات فیلتری را در ساختار تغییر می‌دهد و آنطور که انتظار می‌رود با تغییر این پارامتر محل بیشینه‌ها و  $FWHM$  آنها تغییر می‌کند. برای مقدار  $n_2=5.5$  و  $N=11$  عملاً طول موج جذبی قابل استفاده در طیف جذب وجود ندارد. با افزایش مقدار تا  $N=21$ ، چهار بیشینه جذبی در گستره ۰/۸ تا ۱/۲ برابر طول موج مینا مشاهده می‌شود. در این حالت ضریب  $K_a$  برابر ۲۱/۷۷ می‌شود و مقدار  $FWHM$  تقریباً برابر ۴۷ نانومتر است. با افزایش تعداد لایه‌های کناری طول فیلتر که نور از آن عبور می‌کند افزایش یافته و شدت اثر آن زیاد می‌شود و فیلتر طیفی با مودهایی با پهن شدگی کمتر و تعداد بیشینه‌های بیشتر خواهد داشت که از ساختار عبور کرده و در نهایت جذب می‌شوند. این طیف برای  $N=31$  به هفت بیشینه با پهن شدگی کمی رسیده

## مراجع

- [1] S. Pal, K.B. Ozanyan, and H. McCann, "A spectroscopic study for detection of carbon-monoxide using mid-infrared techniques for single-pass measurement," J. Phys., Conf. Ser., vol. 85, no. 1, pp. 01202, 2007.
- [2] U. Willer, M. Saraji, A. Khorsandi, P. Geiser, and W. Schade, "Near-and mid-infrared laser monitoring of industrial processes, environment and security applications," Optics and Lasers in Engineering, vol. 44, no.7, pp. 699-710, 2006.
- [3] J. P. Kerekes, M. K. Griffin, J. E. Baum, and K. E. Farrar, "Modeling of LWIR hyperspectral system performance for surface object and effluent detection applications," In Proc. SPIE 4381, pp. 348-359, 2001.
- [4] P. Norton, "Third-generation sensors for night vision," Opto-Electronics Review, vol. 14, no. 1, pp. 1-10, 2006.
- [5] C. A. Balaras and A. A. Argiriou, "Infrared thermography for building diagnostics," J. Energy and Buildings, vol. 34, no. 2, pp.171-183, Feb. 2002.
- [6] D. Manolakis and G. A. Shaw, "Detection algorithms for hyperspectral imaging applications," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 19, no. 1, pp. 29-43, Jan. 2002.
- [7] Ph. St. J-Russell, T. A. Birks, and F. D. Lloyd-Lukas, Photonic Bloch waves and photonic band gaps, New York: Plenum Press, 1995.
- [8] K. Sakoda, "Enhanced light amplification due to group-velocity anomaly peculiar to two- and three-dimensional photonic crystal," Opt. Express, vol. 4, no. 5, pp. 167-176, 1999.
- [9] K. Sakoda, Kazuo Ohtaka, and Tsuyoshi Ueta, "Low-threshold laser oscillation due to group-velocity anomaly peculiar to two- and three-dimensional photonic crystals," Opt. Express, vol. 4, no. 12, pp. 481-489, 1999.
- [10] Z. Ku et al, "Analysis of subwavelength metal hole array structure for the enhancement of back illuminated quantum dot infrared photodetectors," Opt. Express, vol. 21, no. 4, pp. 4709-4716, Feb. 2013.
- [11] S. Kalchmair, H. Detz, G.D Cole, A.M Andrews, P. Klang, M. Nobile, R. Gansch, C. Ostermaier, W. Schrenk, and G. Strasser, "Photonic crystal slab quantum well infrared photodetector," J. Appl. Phys. Lett., vol. 98, no. 1, Dec. 2011.

ترتیب تا آخر ادامه می یابد. برای مقدار  $n_2=5.5$  اندکی تفاوت برای این دو ساختار وجود دارد. برای بیشینه‌ای که در طول موج  $0.79$  برابر طول موج مبنا وجود دارد یک جابجایی آبی در ساختار غیر متقارن دیده می‌شود و در بیشینه مربوط به طول موج  $0.8$  برابر طول موج مبنا ضریب جذب برای ساختار متقارن بیشتر می‌شود. برای مقدار  $n_2=1.9$  بجز در طول موج نزدیک به  $1.17$  برابر طول موج مبنا سایر قسمت‌های طیف جذب برای ساختار متقارن و غیر متقارن شبیه هم هستند. در طول موج نزدیک  $1.17$  برابر طول موج مبنا جذب برای ساختار غیر متقارن کمی بیشتر است.



شکل ۱۰. پاسخ جذب بلور فوتونی چرپ‌شده برای آشکارساز مادون قرمز چند رنگ برای دو ساختار متقارن و غیر متقارن برای دو مقدار  $n_2=5.5$  و  $n_2=1.9$

## نتیجه گیری

در این مقاله از ساختارهای بلور فوتونی نقص‌دار و بلور فوتونی چرپ‌شده برای طراحی آشکارساز مادون قرمز استفاده شد. پارامترهای ساختاری مختلف مانند جنس و ضخامت لایه‌ها، تعداد آنها در بالا و پایین لایه جذب برای تغییر شدت انعکاس آینه‌های براگ و ضخامت لایه نقص را برای افزایش دامنه جذب و تنظیم محل دقیق بیشینه جذب مورد کاوش قرار دادیم که می‌توان از این مقادیر برای بهینه سازی آشکارساز مادون قرمز استفاده کرد. در نهایت با استفاده از این ویژگی‌ها ضریب جذب در بلور فوتونی نقص‌دار تا  $96\%$  بهبود یافت. در ساختار بلور فوتونی چرپ‌شده تغییرات پاسخ جذب در محدوده  $0.8$  تا  $1.2$  برابر طول موج مبنا با تغییر ضریب شکست لایه غیرجاذب، تعداد لایه‌ها و ضخامت لایه مرکزی بررسی شده و بیشینه‌های جذب با فاصله  $171$  نانومتر با  $FWHM$  برابر  $60$  نانومتر بدست آمد.

- Progress In Electromagnetics Research, vol. 103, pp. 169-184, 2010.
- [23] M. Renilkumar and P. Nair, "Properties of defect modes in geometrically chirped one-dimensional photonic crystals," Elsevier, Optical Materials, vol. 33, no. 6, pp. 853-858 April 2011.
- [12] J. B. Pendry and A. MacKinnon, "Calculation of photon dispersion relations," Phys. Rev. Lett., vol.69, no. 19, pp. 2772-2775, 1992.
- [13] J. B. Pendry, "Calculating photonic band structure," J. Phys.: Condens. Matter, vol. 8, no. 9, 1085, 1996.
- [14] J. Arriaga, A.J. Ward, and J.B. Pendry, "Order-N photonic band structures for metals and other dispersive materials," Phys. Rev. B, vol. 59, pp.1874-1877, 1999.
- [15] A. Taflove, "Application of the finite-difference time-domain method to sinusoidal steady-state electromagnetic-penetration problems," IEEE Trans. Electro. Compat., vol.22, no. 3, pp.191-202, 1980.
- [16] J. B. Chen, Y. Shen, Wei-Xi Zhou, Yu-Xiang Zheng, Hai-Bin Zhao, and Liang-Yao Chen, "Comparison study of the band-gap structure of a 1D-Photonic Crystal by using TMM and FDTD analyses," Journal of the Korean Physical Society, vol.58, no.4, pp.1014-1020, April 2011.
- [17] W. Zhou, L. Chen, H. Yang, and G. J. Brown, "Spectrally selective infrared absorption enhancement in photonic crystal cavities," In Proc. SPIE, vol. 7095, pp. 709507-709514, 2008.
- [18] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn, and R. D. Meade, Photonic Crystals: Molding the Flow of Light, 2nd edition: Princeton University Press, 2008.
- [19] Alvarado-Rodriguez et al, "Separation of radiation and absorption losses in two-dimensional photonic crystal single defect cavities," Journal of applied physics, vol. 92, no. 11 pp. 6399-6402, 2002.
- [20] Temelkuran, B., E. Ozbay, J. P. Kavanaugh, G. Tuttle, and K. M. Ho, "Resonant cavity enhanced detectors embedded in photonic crystals," Applied physics letters 72, no. 19, pp. 2376-2378, 1998.
- [21] J. P. Vigneron and V. Lousse, "Theory of chirped photonic crystals," Springer, Optical and Quantum Electronics, vol. 39, no. 4-6, pp. 377-385, Mar. 2007.
- [22] C. J. Wu and Z.H. Wang, "properties of defect modes in one-dimensional photonic crystal,"

