

## مطالعه وابستگی دمای بلور فوتونی سه گانه دی الکتریک - بلورمایع - دی الکتریک در یک بعد با ضخامت های مختلف

طاهره فروتن فرد کمار علیا<sup>1\*</sup>، علی واحدی<sup>2</sup>

1. کارشناس ارشد، فیزیک اتمی و مولکولی، دانشگاه آزاد اسلامی تبریز

2. استادیار، فیزیک اتمی و مولکولی، دانشگاه آزاد اسلامی تبریز

تاریخ پذیرش: 1395/06/01

تاریخ دریافت: 1395/03/15

## The Study of Temperature Dependence of One - Dimensional Ternary Dielectric -Liquid Crystal -Dielectric Photonic Crystal in Different Thickness

T. Forutan fard komar olia<sup>\*1</sup>; A. Vahedi<sup>2</sup>

1. MSc., Atomic and Molecular Physics, Tabriz branch Islamic Azad University

2. Assistant Professor, Atomic and Molecular Physics, Tabriz branch Islamic Azad University

Received: 2016/06/04

Accepted: 2016/08/22

### Abstract

In this article a new one-dimensional ternary photonic crystal was introduced and its dependence on temperature and thickness and width of band gap with different angle of radiation in fixed temperature was studied. In this work composition of two dielectrics  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaF}_2$  and two liquid crystals 5CB, UCF-35 structures have proposed. The results show that width of band gap increased with increasing temperature and width of band gap either increasing and shift to shorter wavelength with increasing angle of radiation in fixed temperature.

### Keywords

One-Dimensional Ternary Photonic Crystal – Band Gap – Temperature.

### چکیده

در مقاله حاضر بلور فوتونی سه گانه یک بعدی جدید معرفی و وابستگی آن نسبت به دما در دو ضخامت مختلف و پهنای شکاف باند در دمای ثابت با تغییر زاویه تابش پرتو بررسی شده است. ترکیب دو دی الکتریک  $\text{SiO}_2$  و  $\text{CaF}_2$  با دو بلورمایع 5CB و UCF-35 به صورت جداگانه بلور فوتونی پیشنهادی در این مقاله هستند که نشان می دهد پهنای شکاف باند با افزایش دما افزایش می یابد و با افزایش زاویه تابش پرتو پهنای شکاف باند بلور فوتونی در دمای ثابت علاوه بر افزایش پهنای به سمت طول موج های کوتاه تر پیش می رود.

### واژگان کلیدی

بلور فوتونی یک بعدی سه گانه – شکاف باند – دما.

\* نویسنده مسئول: طاهره فروتن فرد کمار علیا

ایمیل نویسنده مسئول:

\*Corresponding Author: [t.forutan@gmail.com](mailto:t.forutan@gmail.com)

## مقدمه

هر ساختاری که از کنار هم قرار گرفتن حد اقل دو ماده با ضریب شکست متفاوت تشکیل شده باشد، یک بلور فوتونی است. با استفاده از این ساختار می‌توان نفوذ نور را کنترل و شدت نور خروجی از آن را تنظیم کرد. در واقع اساس کار بلور فوتونی تغییر درونی ضریب شکست در مقابل طول موج‌های ورودی و دمای درونی این ساختارها است. افزایش حساسیت حسگرهای اپتیکی شکست‌سنج [1] مانند حسگرهای تشخیص موانع و یا یک حسگر فوتوسل ساده و حسگر گرمایی [2] از جمله کاربردهای بلورهای فوتونی هستند. طول موج‌های منتشر شده در داخل بلور فوتونی مد نامیده می‌شوند و مدهایی که اجازه انتشار ندارند ناحیه‌ای به نام شکاف باند را تشکیل می‌دهند. در واقع شکاف باند ناحیه‌ای برای کنترل نفوذ امواج الکترومغناطیس است و در نتیجه برخورد امواج الکترومغناطیس از هر زاویه‌ای با هر قطبشی و با اتلاف ناچیزی در بلور فوتونی می‌تواند وجود داشته باشد [3]. بلورهای فوتونی یک بعدی به خاطر سادگی در ساخت و صرفه اقتصادی‌شان کاربرد بیشتری نسبت به بقیه دارند. در این نوع از بلورها، موادی که ضریب شکست متفاوت دارند، در کنار هم و در یک ردیف قرار می‌گیرند.

بلور فوتونی مورد بحث در کار حاضر یک بلور فوتونی یک بعدی شامل دو دی‌الکتریک و یک بلورمایع است. مطالعه دی‌الکتریک‌ها اغلب مربوط به ویژگی ذخیره‌سازی و اتلاف انرژی الکتریکی و مغناطیسی در مواد است. دی‌الکتریک‌ها می‌توانند به شکل جامد، مایع و یا گاز در نظر گرفته شوند، با این وجود دی‌الکتریک‌های جامد کاربرد بیشتری دارند و دی‌الکتریک‌های مورد بحث ما هم از این نوع هستند. مولکول‌های سازنده بلورمایع در مقیاس میکروسکوپی نه نظم ساختار مولکولی جامدات و نه بی‌نظمی مولکول‌های سازنده مایعات را دارند، پس ساختار مولکولی آنها را می‌توان چیزی بینابین ساختار جامدات و مایعات دانست [4]. از نظر فیزیک حالت جامد بلورمایع در فاز غیرهمسان‌گرد از جمله مواد دوشکستی است. یعنی دو ضریب شکست به نام‌های ضریب شکست عادی و ضریب شکست غیر عادی در ساختار آن به صورت طبیعی وجود دارد. این ضرایب شکست هم می‌تواند با تغییر جهت‌گیری مولکول‌ها و هم تغییرات دما، تغییر کنند [5]. اخیراً تغییرات شکاف باند با روش تغییر فاز مورد توجه محققان قرار گرفته

است. بلورهای مایع مورد استفاده در این تحقیق از دسته بلورمایع‌های ترموتروپیک هستند و تغییرات دما روی بلور فوتونی شامل بلورمایع بررسی می‌شود. بلورهای مایع دسته ترموتروپیک از مولکول‌های آلی تشکیل می‌شوند.

این مولکول‌ها به صورت میله‌ای و یا به شکل صفحه‌ای هستند و قسمت مرکزی هر دو صلب است. بیشتر بلورهای مایع هم در حالت خاص و هم در حالت عمومی نقش مهمی را در کاربردهای حالت بلورمایع دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به حضور بلورمایع در هدایت پرتو لیزر [6] و قطعات فوتونی [7] اشاره کرد.

## روش‌های محاسباتی

علم بررسی قطعات اپتیکی وابسته به مطالعه علمی چون الکترومغناطیس، اپتیک و نورشناسی است. تابش الکترومغناطیس جفت میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی هستند که با سرعت نور منتشر می‌شوند. در طیف امواج الکترومغناطیس هیچ شکافی وجود ندارد؛ یعنی هر فرکانس دلخواهی را می‌توان تولید کرد. افزون بر این امواج برای انتشار خود نیازی به محیط مادی ندارند. بر این اساس روش کلی مطالعاتی برای برخورد پرتو به بلور فوتونی ارائه می‌شود.

اگر در معادله کلاسیکی کلاسیوس - موسوتی<sup>1</sup>:  

$$a_i = \frac{e-1}{e+2} = \frac{4p}{3} Na_i$$
 که  $e$  نماینده گذردهی الکتریکی،  $a_i$  نماینده قطبش‌پذیری مولکولی در فرکانس‌های پایین و  $N$  نماینده تعداد مولکول‌ها در واحد حجم است، مجذور ضریب شکست  $n^2$  را جایگزین  $e$  کنیم، (به این معنی که  $e = n^2$  است) رابطه لورنتز - لورنتز<sup>2</sup>:  

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{4p}{3} Na_i$$
 را به دست می‌آوریم. هر دو این معادلات برای محیط‌های همگن مناسب‌اند. با توجه به این که بلورمایع یک ماده دو شکستی و در حالت نماتیک ماده‌ای نا همگن است، این رابطه برای بلورمایع طبق فرض ووکر<sup>3</sup> به صورت  

$$\frac{n_{e,o}^2 - 1}{\hat{a}_i^2 \bar{n} + 2} = \frac{4p}{3} Na_{e,o}$$
 تعریف خواهد شد که  $\hat{a}_i^2 \bar{n} = \frac{n_e^2 + 2n_o^2}{3}$ ،  $N$ ،  $a_e$  و  $a_o$  برای هر بلورمایع مختص همان بلورمایع است [8].  $n_e$  و  $n_o$  به

1. Clausius-Mossotti

2. Lorents-Lorenz

3. Vuks

بخش الکتریکی و مغناطیسی تقسیم می شوند در این مقاله واکنش بلور فوتونی مورد نظر در مقابل بخش الکتریکی یک بسته موج TE (TE مد الکتریکی عرضی است به این معنی که میدان الکتریکی پرتو ورودی بر سطح اولیه بلور فوتونی عمود است) مورد مطالعه قرار می گیرد. ماتریس اختصاصی که در مورد بلور فوتونی سه گانه در یک بعد برای موج TE طی یک دوره محاسبه می شود به شکل رابطه شماره (6) است [2].

$$M(d) = \prod_{l=1}^3 \begin{pmatrix} \hat{e} \cos x_l & -i \sin x_l \hat{u} \\ \hat{e} \sin x_l & \cos x_l \hat{u} \end{pmatrix} - \frac{p_l}{\cos x_l} \hat{u} \quad (6)$$

عدد 3 نشان دهنده تعداد لایه ها می باشد و این ماتریس طبق تعداد لایه ها در هم ضرب است. هنگام مطالعه تأثیر دما روی بلور فوتونی،  $x_l$  و  $p_l$  به این صورت تعریف می شوند.

$$x_l = \frac{2p(n_l + Dn_l)(d_l + Dd_l) \cos q_l}{l_0} \quad \text{و} \quad p_l = (n_l + Dn_l) \cos q_l$$

که  $l_0$  طول موج پرتو ورودی و  $q_0$  زاویه برخورد پرتو ورودی به سطح لایه اول بلور فوتونی است. برای یک ساختار N دوره ای رابطه شماره (6) طبق رابطه شماره (7) است.

$$[M(d)]^N = \begin{pmatrix} M_{11} U_{N-1}(a) - U_{N-2}(a) & M_{12} U_{N-1}(a) \hat{u}_0 \\ M_{21} U_{N-1}(a) & M_{22} U_{N-1}(a) - U_{N-2}(a) \hat{u}_0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

با توجه به این که  $U_N(a) = \frac{\sin[(N+1)\cos^{-1}a]}{\sqrt{1-a^2}}$  و عناصر ماتریس رابطه شماره (6) طبق روابط زیر است.

$$M_{11} = (\cos x_1 \cos x_2 \cos x_3 - \frac{p_2 \sin x_1 \sin x_2 \cos x_3}{p_1} - \frac{p_3 \cos x_1 \sin x_2 \sin x_3}{p_2} - \frac{p_3 \sin x_1 \cos x_2 \sin x_3}{p_1})$$

$$M_{12} = -i (\frac{\sin x_1 \cos x_2 \cos x_3}{p_1} + \frac{\cos x_1 \sin x_2 \cos x_3}{p_2} + \frac{\cos x_1 \cos x_2 \sin x_3}{p_3} - \frac{p_2 \sin x_1 \sin x_2 \sin x_3}{p_1 p_3})$$

$$M_{21} = -i (p_1 \sin x_1 \cos x_2 \cos x_3 + p_2 \cos x_1 \sin x_2 \cos x_3 + p_3 \cos x_1 \cos x_2 \sin x_3 - \frac{p_1 p_3 \sin x_1 \sin x_2 \sin x_3}{p_2})$$

$$M_{22} = (\cos x_1 \cos x_2 \cos x_3 - \frac{p_1 \sin x_1 \sin x_2 \cos x_3}{p_2} - \frac{p_2 \cos x_1 \sin x_2 \sin x_3}{p_3} - \frac{p_1 \sin x_1 \cos x_2 \sin x_3}{p_3})$$

ترتیب معرف ضریب شکست عادی و ضریب شکست غیر عادی هستند. برای بلورمابع تغییرات روی ضخامت به قدری ناچیز است که می توان از مقدار آن در مقابل بقیه تغییرات صرف نظر کرد ولی تأثیر تغییرات دما روی ضریب شکست طبق قالب رابطه شماره (1) بررسی می شود. در این رابطه از  $(Dn)_0$  به عنوان ضریب شکست بهره برده شده است [8].

$$Dn = (Dn)_0 \frac{\partial n}{\partial T} - \frac{T}{T_c} \frac{\partial n}{\partial T} \quad (1)$$

بلورمابع در صفر کلونین،  $b$ : نماینده ثابت مختص هر بلورمابع،  $T$ : نماینده دمای متغیر،  $T_c$ : نماینده دما در نقطه تغییر فاز که مختص هر بلورمابع است می باشد. وابستگی این دو ضریب شکست عادی و ضریب شکست غیر عادی به دما در بلورمابع ها هم طبق دو رابطه ساده  $n_e = \langle n \rangle + \frac{2}{3} Dn$  و  $n_o = \langle n \rangle - \frac{1}{3} Dn$  معرفی می شود در صورتی که تمرکز ما

روی دما باشد  $\langle n(T) \rangle = A - BT$  به دو رابطه تقریبی [9]

$$n_e \approx A - BT + \frac{2(Dn)_0}{3} \frac{\partial n}{\partial T} - \frac{T}{T_c} \frac{\partial n}{\partial T} \quad (2)$$

$$n_o \approx A - BT - \frac{(Dn)_0}{3} \frac{\partial n}{\partial T} - \frac{T}{T_c} \frac{\partial n}{\partial T} \quad (3)$$

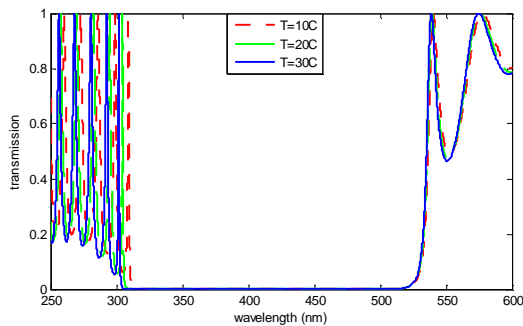
می رسیم. علت این تقریب این است که علاوه بر دما عوامل دیگری چون طول موج هم روی دو ضریب شکست عادی و ضریب شکست غیر عادی تأثیر دارد. مقادیر  $A$  و  $B$  بسته به نوع بلورمابع متغیر هستند. به عنوان نمونه در طول موج  $\lambda = 589 \text{ nm}$   $I = 589 \text{ nm}$  مقادیر  $[A \ B(K^{-1}) \ (Dn)_0 \ b]$  برای بلورمابع 5CB  $[1.7674 \ 5.79 \cdot 10^{-4} \ 0.3505 \ 0.1889]$  و برای بلورمابع UCF-35 برابر است با  $[1.8187 \ 5.32 \cdot 10^{-4} \ 0.5727 \ 0.2719]$  [9]. در این مقاله از حالت کلی رابطه شماره (1) برای مطالعه تأثیر دما روی ضریب شکست بلورمابع استفاده می کنیم. می توان تغییرات دما را روی ضریب شکست و ضخامت مواد برای دی الکتریک ها در قالب رابطه های (4)، (5) مطالعه کرد [2].

$$Dd = ad(DT) \quad (4)$$

$$Dn = gn(DT) \quad (5)$$

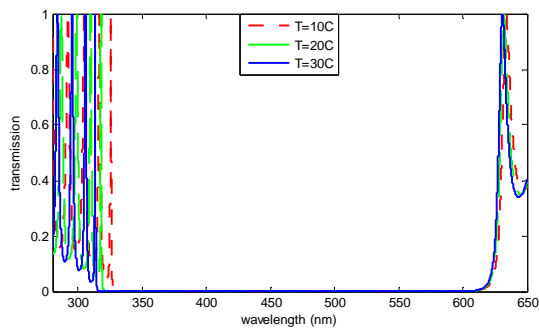
که در رابطه های (4) و (5)،  $a$ : نماینده ضریب انبساط طولی،  $d$ : نماینده ضخامت دی الکتریک،  $g$ : نماینده ضریب ترمو اپتیکی،  $n$ : نماینده ضریب شکست و  $DT$ : نماینده تغییرات دما است. امواج الکترومغناطیس به دو

ضخامت 50nm-150nm-50nm بررسی کرده، سپس اندازه شکاف باندها با یکدیگر مقایسه می‌شوند؛ همچنین به منظور بررسی بیشتر تغییرات پهنای شکاف باند بلور فوتونی مورد نظر را با ضخامت 50nm-100nm-50nm در دمای نزدیک به دمای تغییر فاز و سه زاویه، پرتو تابش  $q_0 = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  مطالعه می‌کنیم.



نمودار شماره 1. تأثیر دما روی تغییرات پهنای شکاف باند بلور فوتونی  $\text{SiO}_2/5\text{CB}/\text{CaF}_2$  با ضخامت 100nm-50nm-100nm در سه دمای  $10^\circ\text{C}$ ،  $20^\circ$ ،  $30^\circ$  و زاویه تابش  $q_0 = 0^\circ$

طبق نمودار شماره 1 با افزایش دما پهنای شکاف باند از سمت راست تغییرچندانی نمی‌کند اما از سمت چپ پهن‌تر می‌شود و به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر پیش می‌رود.



نمودار شماره 2. تأثیر دما روی تغییرات پهنای شکاف باند بلور فوتونی  $\text{SiO}_2/5\text{CB}/\text{CaF}_2$  با ضخامت 150nm-50nm-150nm در سه دمای  $10^\circ\text{C}$ ،  $20^\circ$ ،  $30^\circ$  و زاویه پرتو تابش  $q_0 = 0^\circ$

در نمودار شماره 2 هم شکاف باند از سمت چپ پهن‌تر می‌شود و در نمودار حاضر پهنای شکاف باند عریض‌تر است و طول موج‌های بلندتر را نیز شامل می‌شود. حال تغییرات پهنای شکاف باند بلور فوتونی  $\text{SiO}_2/5\text{CB}/\text{CaF}_2$  را با

ضریب انتقال چندلایه‌ای برای بررسی رفتار مدها در بلور فوتونی معرفی شده از رابطه (8) محاسبه می‌شود.

$$t = \frac{2 p_0}{(m_{11} + m_{12} p_0) p_0 + (m_{21} + m_{22} p_0)} \quad (8)$$

که در این رابطه  $n_0 = 1$ ،  $p_0 = n_0 \cos q_0$  ضریب شکست هوا و  $m_{ij}$  عناصر ماتریس  $[M(d)]^N$  هستند. در نهایت برای محاسبه رابطه انتقالی کل از رابطه (8) بهره می‌گیریم [2].

$$T = |t|^2 \quad (8)$$

## بحث و نتیجه‌گیری

طبیعت امواج الکترومغناطیس شناخته شده است و در قسمت قبل کم و بیش در چارچوب ریاضی بررسی شد. اکنون می‌خواهیم بلور فوتونی پیشنهادی و پاسخ روش‌های محاسباتی روی آن را برای  $N=10$  در قالب نمودارها بررسی و با هم مقایسه کنیم. مشخصات اپتیکی دی‌الکتریک‌ها و بلورمایع پیشنهادی با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی طبق جدول‌های شماره 1 و 2 است.

جدول 1. مشخصات اپتیکی دی‌الکتریک‌ها [10]

نام ماده	ضریب شکست: $n$	ضریب ترمو اپتیکی: $g$	ضریب انبساط طولی: $a$
$\text{SiO}_2$	1.444	$0.55 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$	$11.9 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$
$\text{CaF}_2$	1.4226	$19 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$	$-11.7 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$

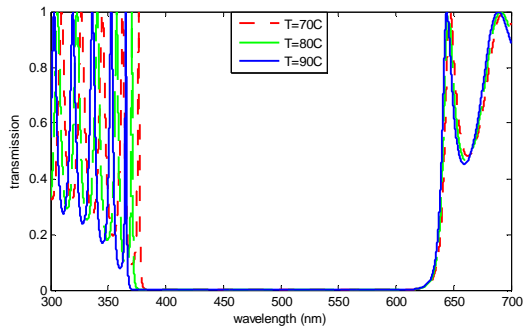
حال این اجزای معرفی شده به صورت  $\text{SiO}_2/5\text{CB}/\text{CaF}_2$  و  $\text{SiO}_2/\text{UCF}-35/\text{CaF}_2$  در نظر گرفته شدند که 5CB بلورمایع ساده و UCF-35 از گروه بلورمایع‌های ترکیبی هستند. قسمت‌های مختلف بلور فوتونی با ضخامت 50nm-100nm-50nm در کنار هم قرار می‌گیرند. پاسخ

جدول 2. مشخصات اپتیکی بلورمایع‌ها [8]

نام ماده	ضریب شکست: $(Dn)_0$	ضریب بلورمایع: $b$	دمای تغییر فاز: $T_c$
5CB	0.3505	0.1889	$33.4^\circ\text{C}$
UCF-35	0.5727	0.2719	$95.3^\circ\text{C}$

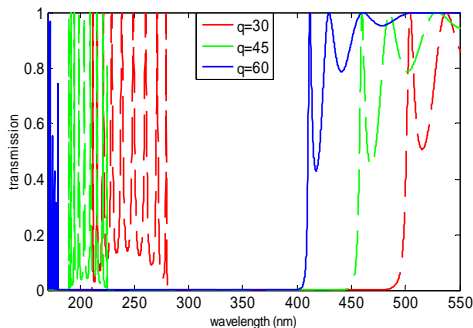
بلورهای فوتونی معرفی شده را یک بار در سه دمای مختلف و برخورد عمودی نور با ضخامت معرفی شده و بار دیگر با

کوتاهتر پیش می‌رود. در نمودار شماره 5 ضخامت بلورمایع در بلور فوتونی حاضر را 50nm افزایش می‌دهیم و تأثیر دما را روی بلور فوتونی  $\text{SiO}_2/\text{UCF}-35/\text{CaF}_2$  با ضخامت 50nm-150nm-50nm بررسی می‌کنیم.



**نمودار شماره 5.** تأثیر دما روی تغییرات پهنای شکاف باند بلور فوتونی  $\text{SiO}_2/\text{UCF}-35/\text{CaF}_2$  با ضخامت 50nm-150nm-50nm در سه دمای  $90, 80, 70^\circ\text{C}$  و زاویه پرتو تابش  $q_0 = 0^\circ$ .

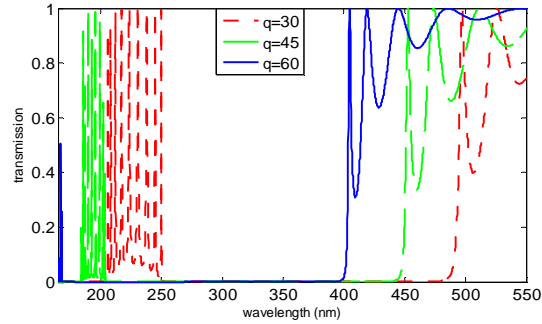
طبق نمودار شماره 5 اندازه پهنای شکاف باند با افزایش دما افزایش می‌یابد. نمودار نشان می‌دهد که مدها از سمت چپ نسبت به سمت راست بیشتر جابجا می‌شوند. به منظور بررسی بیشتر تغییرات پهنای شکاف باند بلور فوتونی  $\text{SiO}_2/\text{UCF}-35/\text{CaF}_2$  را با ضخامت 100nm-50nm-50nm در دمای  $90^\circ\text{C}$  (دمای نزدیک به دمای تغییر فاز) و سه زاویه پرتو تابش  $q_0 = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  در نمودار شماره 6 مطالعه می‌کنیم.



**نمودار 6.** پهنای شکاف باند بلور فوتونی

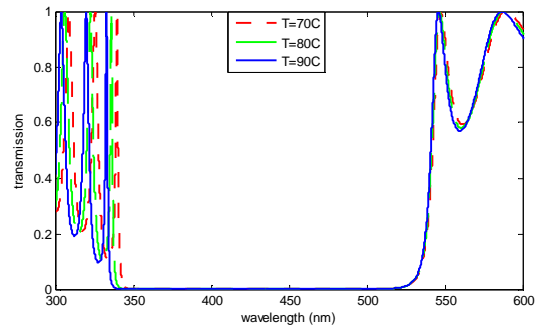
50nm-100nm-50nm با ضخامت  $\text{SiO}_2/\text{UCF}-35/\text{CaF}_2$  در دمای  $90^\circ\text{C}$  و سه زاویه پرتو تابش  $q_0 = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ .

ضخامت 50nm-100nm-50nm در دمای  $30^\circ\text{C}$  (دمای نزدیک به دمای تغییر فاز) و سه زاویه پرتو تابش  $q_0 = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  بررسی می‌کنیم.



**نمودار شماره 3.** پهنای شکاف باند بلور فوتونی  $\text{SiO}_2/5\text{CB}/\text{CaF}_2$  با ضخامت 50nm-100nm-50nm در دمای  $30^\circ\text{C}$  و سه زاویه پرتو تابش  $q_0 = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ .

بر اساس نمودار شماره 3 پهنای شکاف باند بلور فوتونی  $\text{SiO}_2/5\text{CB}/\text{CaF}_2$  با ضخامت 50nm-100nm-50nm در دمای  $30^\circ\text{C}$  با افزایش زاویه تابش افزایش می‌یابد و به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر حرکت می‌کند. در نمودار شماره 4 بلورمایع را تعویض و به جای 5CB، UCF-35 را جایگزین می‌کنیم؛ سپس تغییرات دمایی روی بلور فوتونی را در برخورد عمودی مطالعه می‌کنیم.



**نمودار شماره 4.** تأثیر دما روی تغییرات پهنای شکاف باند بلور فوتونی  $\text{SiO}_2/\text{UCF}-35/\text{CaF}_2$  با ضخامت 100nm-50nm-50nm در سه دمای  $90, 80, 70^\circ\text{C}$  و زاویه پرتو تابش  $q_0 = 0^\circ$ .

با کمی دقت در نمودار شماره 4 می‌بینیم که با افزایش دما، پهنای شکاف باند از سمت چپ به طرف طول موج‌های

شماره 6 نشان می‌دهد که با افزایش زاویه تابش پهنای شکاف باند بلور فوتونی  $\text{SiO}_2/\text{UCF} - 35/\text{CaF}_2$  با ضخامت  $50\text{nm}-100\text{nm}-50\text{nm}$  در دمای  $90^\circ\text{C}$  پهن‌تر می‌شود و به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر پیش می‌رود.

با توجه به مشاهدات قسمت قبل در تمامی بلورهای فوتونی پیشنهادی در این مقاله، برای پرتو ورودی در زاویه برخورد

### نتیجه‌گیری

نتیجه‌گیری

### منابع

- شماره 6 نشان می‌دهد که با افزایش زاویه تابش پهنای شکاف باند بلور فوتونی  $\text{SiO}_2/\text{UCF} - 35/\text{CaF}_2$  با ضخامت  $50\text{nm}-100\text{nm}-50\text{nm}$  در دمای  $90^\circ\text{C}$  پهن‌تر می‌شود و به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر پیش می‌رود.
- با توجه به مشاهدات قسمت قبل در تمامی بلورهای فوتونی پیشنهادی در این مقاله، برای پرتو ورودی در زاویه برخورد
- نتیجه‌گیری
- منابع
- confined 5CB liquid crystal film using a surface forces apparatus, *Langmuir* 13, (2015) 3965-3972.
- [6] H Coles, S Morris, Liquid-crystal lasers, *Nature Photonics* 4, (2010) 676-685.
- [7] H.K. Bisoyi, Q. Li, Light-directing chiral liquid crystal nanostructures: from 1D to 3D, *ACCOUNTS* 47, (2014) 3174-3195.
- [8] J. Li and S.T. Wu, Self-consistency of Vuks equations for liquid-crystal refractive indices, *Journal of Applied Physics* 96, (2004) 6253-6258.
- [9] J. Li, S. Gauza, and S.T. Wu, Temperature effect on liquid crystal refractive indices, *Journal of applied physics* 96, (2004), 19-24.
- [10] M. Han, and A. Wang, Temperature compensation of optical microresonators using a surface layer with negative thermo-optic coefficient, *Optics Letters* 32, (2007) 1800-1802.
- [1] E. Descrovi and et al, New Sensing Strategies Based on Surface Modes in Photonic Crystals, *springer* 387, (2015) 321-337.
- [2] A. Banerjee, Enhanced temperature sensing by using one-dimension ternary photonic band gap structures, *Progress In Electromagnetics Research Letters* 11, (2009) 129-137.
- [3] A. Cavanna and et al, Hybrid photonic-crystal fiber for single-mode phase matched generation of third harmonic and photon triplets, *optica* 3, (2016) 952-955.
- [4] J. Li and Sh. Tson, Extended Cauchy equations for the refractive indices of liquid crystals, *Journal of Applied Physics* 95, (2004) 896-901.
- [5] K. Kristiansen, H. Zeng, B. Zappone, , Simultaneous measurements of molecular forces and electro-optical properties of a