

فیلترهای تنظیم پذیر چند کاناله مبتنی بر نانوبلور فوتونی ابررسانا تحت تابش پرتو گاوسی

ربابه طالبزاده^{1*}، مهرداد باوقار²

1. استادیار، گروه فیزیک، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

2. کارشناسی ارشد، فیزیک، مجتمع پژوهشی شمال غرب کشور، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران

تاریخ پذیرش: 1395/06/08

تاریخ دریافت: 1395/04/30

Tunable Multiple-Channel Filters based on Superconducting-Nanophotonic Crystal under Irradiation of Gaussian Beam

R. Talebzadeh^{*1}, M. Bavaghar²

1. Assistant Professor, Department of Physics, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

2. MSc., Physics, North West Research Complex, Nuclear Science & Technology Research Institute, AEOI

Received: 2016/07/20

Accepted: 2016/08/29

Abstract

In this paper, we studied filtering properties of one-dimensional nanophotonic crystal with asymmetric geometry structure under irradiation Gaussian beam. By using the transfer matrix method and Two-Fluid model, we observed that nano layered structure containing superconductor can act as a multiple-channel filter. So that, number of resonant modes depend on designing filter (number of joint interference). We also investigated the effects of incident angle of Gaussian beam, radial coordinate of Gaussian beam (r) and the temperature on the filtering behavior of nano structure. For long Rayleigh ranges our results for the Gaussian beam were the same as that for plane wave. The proposed filter structure can be used in modern communication systems.

Keywords

Filter, Superconductor, Photonic Crystal and Gaussian beam.

چکیده

در این مقاله با تابش پرتو گاوسی به یک نانو بلور فوتونی یک بعدی با ساختار هندسی پادمتقارن، به بررسی ویژگی‌های فیلتری از آن پرداختیم. با بهره‌گیری از روش ماتریس انتقال و مدل دوشاره‌ای ملاحظه کردیم که نانو ساختار لایه‌ای شامل لایه ابررسانا می‌تواند به عنوان فیلتر چند کاناله عمل کند، طوری که تعداد مندهای تشدید و وابسته به طراحی فیلتر (تعداد فصل مشترک) می‌باشد. همچنین اثر زاویه تابش پرتو گاوسی، مختصه شعاعی باریکه گاوسی و دمای محیط را بر روی رفتار فیلتری نانوساختار مورد مطالعه، بررسی کردیم. نشان دادیم که به ازای طول رایلی بی‌نهایت نتایج به دست آمده برای پرتو گاوسی متناظر با موج تخت هستند. ساختار فیلتری پیشنهادی در ارتباطات مدرن می‌تواند مفید واقع شود.

واژگان کلیدی

فیلتر، ابررسانا، بلور فوتونی و پرتو گاوسی.

مقدمه

بلورهای فوتونی ساختارهای تناوبی از مواد دی‌الکتریک هستند که در یک، دو یا سه بعد آرایش یافته‌اند [1-2]. ساختار بلور فوتونی به گونه‌ای است که امواج الکترومغناطیسی تک‌فام با فرکانس معینی نمی‌توانند در آن انتشار یابند و گاف باندهایی به وجود می‌آید که این تشابه با نیمه رساناها اهمیت بلور فوتونی را آشکار می‌سازد [3].

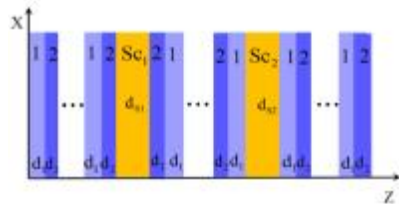
نیاز مبرم به استفاده از بلورهای فوتونی در ادوات نوری را می‌توان در یک کلمه، یعنی مهندسی فوتون که به کنترل انتشار فوتون در مقیاس طول موج دلالت دارد، خلاصه کرد. برای بالا بردن سرعت انتقال و پردازش اطلاعات، استفاده از ابزارهای تمام نوری به جای الکترونی یک امر ضروری شده است، از جمله می‌توان به صافی‌های نوری، کلید و دیود تمام نوری اشاره کرد. میرایی امواج الکترومغناطیسی در داخل بلورهای فوتونی فلزی مانع از بروز بسیاری از خواص بالقوه می‌گردد. با جایگزینی مواد ابررسانا به جای مواد فلزی می‌توان بر این نقیصه فائق آمد. تابع دی‌الکتریک مواد ابررسانا در اثر دما و میدان مغناطیسی به شدت تحت تاثیر قرار می‌گیرد. در حالت رسانایی، میدان الکترومغناطیسی می‌تواند در ماده بدون هیچ محدودیتی انتشار یابد؛ به عبارتی عمق نفوذ بی‌نهایت می‌شود، اما در حالت ابررسانایی موج الکترومغناطیسی می‌تواند در حد عمق نفوذ لندن مواد انتشار یابد؛ بنابراین در اثر اعمال دما و میدان مغناطیسی، می‌توانیم تنظیم‌پذیری بیشتری را در بلورهای فوتونی ساخته شده از ابررساناها را داشته باشیم.

اگر ساختار تناوبی بلور فوتونی به هم زده شود، بلور دچار نقص می‌گردد؛ حضور نقص در ساختار متناوب باعث به وجود آمدن مدهای عبوری موسوم به مدهای نقص می‌شود که افزایش ناگهانی چگالی حالات را در بردارد. مدهای نقص موجب شکل‌گیری حالات جای‌گزیده می‌شوند که به معنی گیرافتادن انرژی در محل نقص است [4-5]. پهنا و شدت تراگسیلی مدهای نقص از جمله پارامترهای چالشی هستند که در مقوله طراحی میکروکاوک‌های لیزری و فیلترهای نوری چند کاناله مورد استفاده قرار می‌گیرند و از طرف دیگر زاویه تابش و نوع قطبش میدان از پارامترهای مهم و مؤثر در رفتار انتشاری یک موج الکترومغناطیسی هستند. روش ماتریس انتقال یکی از روش‌های متداول برای بررسی طیف تراگسیلی از یک بلور فوتونی است [6]. در این روش از یک موج تخت با توزیع شدت عرضی ثابت تحت تابش‌های عمودی و یا مایل با قطبش‌های مختلف

استفاده می‌شود. ولی باریکه خروجی از اکثر منابع لیزری به صورت گاوسی است که دامنه و فاز آن در راستای عرضی ثابت نیست. با وجود جمله فازی وابسته به مختصه شعاعی در میدان پرتو گاوسی، نسبت به موج تخت که فاز آن در هر صفحه عمود بر راستای انتشار مقدار ثابتی است، به نظر می‌رسد که گاف باند نواری نیز که از روی هم‌نهی موج‌های مختلف راست رو و چپ رو در هر لایه ساختار بلور فوتونی حاصل می‌شود، به مختصه شعاعی Γ بستگی داشته باشد. در این مقاله، ابتدا طیف تراگسیل نانوبلور فوتونی ابررسانا را بررسی کردیم، سپس با افزودن لایه ابررسانای دیگری، به مطالعه رفتار فیلتری ساختار جدید پرداختیم.

مدل نظری

در این مقاله، رفتار فیلتری مدهای تشدیدی نانو بلور فوتونی با ساختار هندسی $(AB)^M SC_1 (BA)^N SC_2 (AB)^M$ ، که لایه نقص آن از جنس ماده ابررسانای دمای بالا $T_c=92K$ $SC_1=SC_2=(YBa_2Cu_3O_{10})$ (با دمای بحرانی $T_c=92K$) و عمق نفوذ لندن $(l_0 = 200 \text{ nm})$ جایگزین شده را تحت تابش پرتو گاوسی مطالعه می‌کنیم. برای این منظور لایه اول از جنس $SrTiO_3$ با ضریب شکست $n_1=2.437$ و ضخامت d_1 و نیز لایه دوم، از جنس Al_2O_3 با ضریب شکست $n_2=1.767$ و ضخامت d_2 انتخاب شده است (مطابق شکل 1).



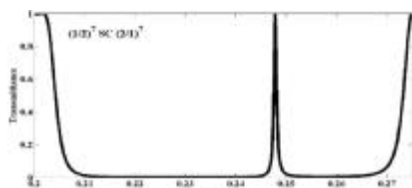
شکل 1. ساختار نانوبلور فوتونی شامل لایه‌های نقص ابررسانا در ارتباط با لایه‌های ابررسانا، بیشتر خواص مواد ابررسانا را می‌توان با استفاده از مدل دو شماره‌ای [7] توصیف کرد. اگر نمونه را بدون اتلاف در نظر بگیریم، رسانندگی کاملاً موهومی است و به تبع آن ضریب گذردی نسبی الکتریکی ابررسانا با استفاده از مدل دو شماره‌ای و تقریب‌های اعمالی و استفاده از عمق نفوذ لندن در حالت دمای غیر صفر و بدون اتلاف از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$e(w) = 1 - \frac{e^2 c}{8\pi \omega} \frac{\omega_0^2}{\omega(\omega + i\gamma)} \quad (1)$$

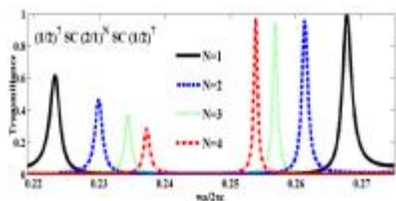
که N, M تعداد تناوب بلور فوتونی را نشان می‌دهند و M_1 و M_2 به ترتیب ماتریس انتقال مربوط به لایه 1 و 2 هستند و همچنین M_{sc1} و M_{sc2} به ترتیب معرف ماتریس انتقال لایه‌های ابررسانا (نقص) اول و دوم در ساختار مورد مطالعه هستند.

بحث و نتیجه‌گیری

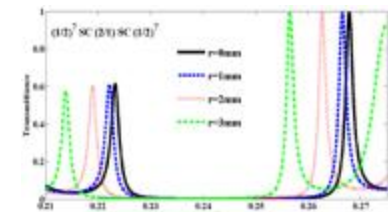
نمودارهای 1 و 2 به ترتیب طیف تراگیل نانو ساختار فیلتری با ضخامت‌های $d_1 = 420\text{nm}$ ، $d_2 = 580\text{nm}$ و $d_{s1} = d_{s2} = 20\text{nm}$ را نشان می‌دهند. مشاهده می‌کنیم که در حضور یک لایه نقص، مد تشدیدی در گاف باند فوتونی ظاهر می‌شود (مطابق نمودار 2) در حالی که با در نظر گرفتن دو لایه نقص در نانو ساختار مورد مطالعه دو مد تشدید قابل مشاهده است؛ بنابراین ساختار اولی را فیلتر تک کاناله و دومی را فیلتر دوکاناله می‌نامیم. همچنین با افزایش تعداد تناوب لایه میانی امکان تنظیم‌پذیری بهتری در فیلتر دوکاناله به وجود می‌آید و دو مد تشدیدی به هم نزدیک می‌شوند. حالت بهینه این فیلتر به ازای 4 تناوب در ساختار میانی حاصل می‌شود.



نمودار 1. طیف تراگیل فیلتر تک کاناله در دمای $T=4.2\text{K}$ تحت تابش پرتو گاوسی به ازای $r=0$



نمودار 2. طیف تراگیل فیلتر دو کاناله در دمای $T=4.2\text{K}$ تحت تابش پرتو گاوسی به ازای $r=0$



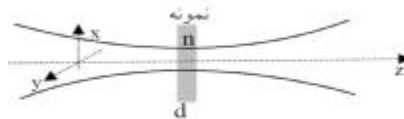
نمودار 3. رفتار تراگیلی فیلتر دو کاناله به ازای $z_0 = 10\text{mm}$ و مقادیر مختلف r

$I(T)$ عمق نفوذ وابسته به دما که از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$I(T) = I_0 / \sqrt{1 - (T/T_c)^p} \quad (2)$$

I_0 عمق نفوذ لندن در دمای صفر درجه کلوین و T_c دمای بحرانی ابررسانا است. با فرض $m=1$ ضریب شکست وابسته به فرکانس و دمای ابررسانا، به صورت $n = \sqrt{\epsilon}$ بیان می‌شود. لازم به ذکر است که برای ابررساناهای دمای بالا $p=2$ ، $T_c \approx 77\text{K}$ و برای ابررساناهای دمای پائین $p=2$ ، $T_c \approx 77\text{K}$ است.

مطابق شکل 2، تیغه‌ای به ضخامت d و ضریب شکست n را در نظر می‌گیریم که پرتو گاوسی با قطبش میدان الکتریکی TE به طور عمودی به آن می‌تابد.



شکل 2. الگوی تابش موج گاوسی به یک تیغه می‌دانیم توزیع میدان الکتریکی موج گاوسی مطابق زیر است [8]:

$$u(r, q) = u_0 \frac{iz_0}{q} \exp\left(-\frac{iz_0 r^2}{2q}\right) \quad (3)$$

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - i \frac{\lambda}{\pi w^2}$$

که در این رابطه z_0 طول رایلی و R شعاع انحنای باریکه گوسی است. جمله آخر، جمله نمایی فازی است که به مختصات شعاعی r (عمود بر راستای انتشار) بستگی دارد. با فرض $z_0 \gg d$ و با اعمال شرایط مرزی، ماتریس انتقال تیغه به صورت زیر به دست می‌آید [9]:

$$M(r, \omega) = \begin{bmatrix} \cos(\xi(r) \alpha d / c) & \frac{1}{\xi(r)} \sin(\xi(r) \alpha d / c) \\ -\xi(r) \sin(\xi(r) \alpha d / c) & \cos(\xi(r) \alpha d / c) \end{bmatrix} \quad (4)$$

ماتریس انتقال تیغه‌ای تحت تابش پرتو گاوسی که در آن $x(r) = (1 + r^2 / 2z_0^2) n$ است. همان طوری که مشاهده می‌شود، عناصر ماتریسی به مختصه شعاعی r بستگی دارد. در صورتی $r=0$ شود و یا طول رایلی به سمت بی‌نهایت میل کند باریکه گوسی به موج تخت تبدیل و رابطه (4) به ماتریس انتقال رایج موج تخت تبدیل می‌شود، در نتیجه ماتریس انتقال نهایی با رابطه زیر نشان داده می‌شود:

$$M_T = (M_1 M_2)^M M_{sc1} (M_2 M_1)^N M_{sc2} (M_1 M_2)^M \quad (5)$$

همچنین با در نظر گرفتن پرتو گاوسی مشخصی با مختصه شعاعی $r = 2\text{mm}$ تاثیر دما و زاویه فرودی پرتو تابشی را بر روی رفتار تراگسیلی فیلتر دو کاناله، مطابق نمودارهای 4 و 5 رسم کردیم. مشاهده کردیم که با افزایش دما و تاثیر آن بر ضریب شکست لایه ابرسانایی، فرکانس مرکزی مدهای نقص به سمت فرکانسهای کوچکتر جابهجا می شوند و نیز ارتفاع مدها تغییر محسوسی می کنند. درحالیکه با افزایش زاویه موج تابشی، موقعیت آنها به سمت فرکانسهای بزرگتر جابهجا می شوند.

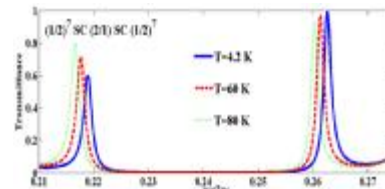
بنابراین توانستیم با مطالعه طیف تراگسیلی نانوبلور فوتونی فیلتر یک کاناله و دو کاناله ای وابسته به زاویه تابش، تعداد تناوب، دما و نیز مختصه شعاعی پرتو گاوسی طراحی کنیم. طوری که رفتار فیلتری بهینه ای را به ازای $\theta = 35^\circ$ ، $r = 2\text{mm}$ و $T = 80\text{K}$ ، $N = 4$ خواهیم داشت.

سپاسگزاری

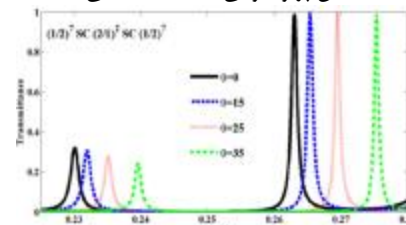
این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی تحت حمایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز می باشد.

- [1] Y. Zeng, Y. Fu, X. Chen, W. Lu and H. Agren; Extended plane-wave based transfer matrix approach to simulating dispersive photonic crystal. solid state communication (2006) 328-333.
- [2] E. Yablonovich, Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics. Phys. Rev. Lett 58 (1987) 2059.
- [3] E.A. Rehman, A. Shaarawi, Defect mode in periodic and quasi periodic one dimensional photonic structures. J. Mater Sci. Ma ter. Electron 20 (2009) 153-158.
- [4] S.G. Johnson and J.D. Joannopoulos, Photonic Crystals: The Road from Theory to Practice. Boston: Kluwer (2002).
- [5] K. Sakoda, Optical Properties of Photonic Crystals, Springer Verlag Berlin Heidelberg (2005).

نتایج به دست آمده از نمودار 3 نشان می دهد که مدهای تشدیدی ایجاد شده به فاصله شعاعی از محور انتشار بستگی دارند. با افزایش مختصه شعاعی پرتو گاوسی فرکانس مرکزی مدها به سمت فرکانسهای کوچکتر جابهجا می شوند. همچنین مشاهده می کنیم با میل به سمت بی نهایت طول رایلی، نتایج پرتو گاوسی به نتایج موج تخت (نمودار 2) میل می کند.



نمودار 4. طیف تراگسیل فیلتر دو کاناله مختلف دمای ابرسانا تحت تابش پرتو گاوسی با مختصه شعاعی $r = 2\text{mm}$



نمودار 5. طیف تراگسیل فیلتر دو کاناله برای مقادیر مختلف زاویه موج تابشی پرتو گاوسی با مختصه شعاعی $r = 2\text{mm}$

منابع

- [6] N.h. Liu, Sh.Y Zhu and H. Chen, Superluminal pulse propagation through one dimensional photonic crystals with a dispersive defect, Physical Review E 65, (2002) 046607.
- [7] T. Van Duzer and C.W. Turner, Principles of Superconductive Devices and Circuits, (1981) 124
- [8] Y. Hu and Sh. Wen, Propagation of Gaussian beams in negative-index metamaterials with cubic nonlinearity, Optics Communications 281, (2008) 2663-2669.
- [9] K. Jamshidi-Ghaleh and R. Abdi-Ghaleh; "Photonic bandgap under irradiation of a Gaussian beam"; Journal of Nanophotonics 5, (2011) 051817.