تراگسیل تراهرتزی در نانوبلور فوتونی ابررسانا شامل فراماده

اصلان ظهیری شادباد، ربابه طالب زاده*

گروه فیزیک، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

چکیده - انتشار امواج الکترومغناطیسی تراهرتزی در نانوبلورهای فوتونی ابررسانا شامل فراموا‌د را با بهره گیری از مدل دو-شاره و نیز روش ماتریس انتقال بررسی کردیم. نتایج، فرکانس قطعی را نشان دادند که در فرکانس های بالاتر از آن فرکانس، اموج الکترومغناطیسی می توانند در این نانو ساختارها منتشر شود. اثر برخی از پارامترهای مربوط به فراموا‌د مانند ضخامت و ضریب گذردهی الکتریکی را مطالعه کردیم. مشاهده کردیم که ضخامت فراموا‌د همانند دمای اعمالی، فرکانس قطع را به طور موثر تنظیم می کند. این نانو ساختارها در طراحی ابزارهای اپتوالکترونیکی مفید واقع می شوند.

کلید واژه- ابررسانا، فراماده، فرکانس قطع، نانوبلور فوتونی.

THz transmittance in superconducting nano-photonic crystal containing metamaterial

Aslan Zahiri Shadbad, Robabeh Talebzadeh

Department of Physics, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Abstract- Electromagnetic waves transmission at THz in superconducting nano-photonic crystsls containing metamaterials has been theoretically investigated based on the transfer matrix method together with two-fluid model. The results show the existence of a cutoff frequency in such structures. Electromagnetic wave is allowed to propagate through the structure when its frequency is higher than cutoff frequency. We studied the effect of some parameters of metamaterials such as the thicknesses and electric permeability coefficient. It is seen that this cutoff frequency can be efficiently tuned dependent on thicknesse of metamaterials, and the operating temperature as well. These structures can be useful in design of optoelectronic devices.

Keywords: cutoff frequency, metamaterial, nano-photonic crystsl, superconductor.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

۱- مقدمه

بلورهای فوتونی دارای کاربردهای عملی وسیعی در شاخه های مختلف از جمله در حوزه الکترونیک و فوتونیک هستند. با انتشار دو مقاله مهم از یابلونویچ و جان در سال ۱۹۸۷ بلورهای فوتونی معرفی شدند [۱-۲]. بلور هایی که به واسطه آرایش تناوبی شان، امواج الکترومغناطیسی با فرکانس های معین در آنها انتشار نمی یابد. این ویژگی بلورهای فوتونی را برای مطالعه مهم کرده است بلورهای فوتونی به علت ساختار لایه ای متناوب در یک، دو و یا سه بعد خواص اپتیکی منحصر به فرد و بسیار کاربردی از خود بروز می دهند. قابلیت تنظیم پذیری طیف تراگسیلی بلورهای فوتونی از ویژگی های اساسی آنهاست که با کنترل خواص اپتیکی مواد استفاده شده در طراحی بلور فوتونی حاصل می شود. بنابراین مواد با خواص اپتیکی قابل کنترل بسیار قابل توجه اند از جمله این مواد می توان به ابررساناها و نیز فرامواد اشاره کرد [۳-۴].

فرا مواد که اولین با در سال ۱۹۶۷ توسط وسلاگو پیش بینی شدند[۳]، ساختاری مصنوعی دارند و در سال های اخیر در بلورهای فوتونی مورد استفاده قرار گرفته اند. این مواد دارای ضرایب گذردهی و تراوایی منفی و در نتیجه ضریب شکست منفی هستند. در این مواد بر خلاف مواد موجود در طبیعت، بردار میدان الکتریکی و بردار میدان مغناطیسی و بردار موج یک دستگاه چپگرد را تشکیل می دهند، که از این رو مطالعه انتشار امواج الکترومغناطیسی در این مواد حائز اهمیت است [۳]. از طرفی با توجه به جذب پایین ابررساناها نسبت به فلزات و در نتیجه اتلاف پایین آنها، بلورهای فوتونی حاوی مواد ابررسانا بسیار قابل توجه اند [۴].

هردو نوع بلورهای فوتونی ابررسانا و نیز بلورهای فوتونی چپگرد به طور مجزا فراوان مطالعه شده اند [۴-۵]. با توجه به خواص اپتیکی منحصر به فرد هر دو گروه مواد ابررسانا و فرامادە، در این مقاله نانو بلورهای فوتونی با تناوب دوتایی ابررسانا -فرامادە را مطالعه کردیم و طیف تراگسیل این بلور های فوتونی را با بهره گیری از روش ماتریس انتقال بررسی کرده و پاسخ اپتیکی این نانو ساختار های لایه ای را بنا بر نوع و ضخامت لایه ها و ... مورد بررسی قرار می دهیم.

۲- ساختار و فرمول بندی مساله

یک نانوساختار لایه ای یک بعدی را در نظر می گیریم که هر تناوب آن شامل یک سلول دوتایی از مواد ابررسانا و فرامادە می باشد که N بار در کنار هم قرار داده شده اند. این نانوبلور فوتونی را به اختصار $(M\text{-}S)^N$ می نامیم. طرحواره شماتیک از نانوساختار مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. در ارتباط با لایه های ابررسانا، بیشتر خواص مواد ابررسانا را می توان توسط مدل دو شاره ای توصیف کرد [۴]. اگر نمونه را بدون اتلاف در نظر بگیریم رسانندگی کاملاً موهومی بوده و به تبع آن ضریب شکست لایه ابررسانا با استفاده از مدل دو شاره ای و تقریب های اعمالی و استفاده از عمق نفوذ لندن در حالت دمای غیر صفر و بدون اتلاف از رابطه زیر بدست می آید[۴]:

$$n_s(\omega,\mathrm{T}) = \sqrt{\varepsilon_s(\omega,\mathrm{T})} = \sqrt{1-\frac{1}{\omega^2\mu_0\varepsilon_0\lambda_L^2}} \qquad (۱)$$

که $\lambda_L \equiv \lambda_0 / \sqrt{1-(\frac{T}{T_c})^2}$ و λ_0 عمق نفوذ لندن در دمای صفر درجه کلوین و $\mathrm{T_c}$ دمای بحرانی ابررسانا می باشد.

روش مطالعه ما، روش ماتریس انتقال است. بر اساس این روش با استفاده از شرایط مرزی برای پیوستگی مولفه های میدان الکتریکی و مغناطیسی، می توان عناصر دامنه های تابشی و بازتابشی در دو نقطه به فاصله Δz در هر یک از لایه های نانوساختار را توسط ماتریسی بهم مربوط ساخت که این ماتریس مشهور به ماتریس انتقال می باشد[۴]:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos(\mathrm{k_z}^j \Delta z) & \frac{1}{iq_j}\sin(\mathrm{k_z}^j \Delta z) \\ iq_j \sin(\mathrm{k_z}^j \Delta z) & \cos(\mathrm{k_z}^j \Delta z) \end{bmatrix}, \qquad (۳)$$

که در آن $k_z{}^j = (\omega/c)\sqrt{\varepsilon_j\mu_j}\sqrt{1-(\sin^2\theta/\varepsilon_j\mu_j)}$ مولفه z بردار موج در هر یک از لایه ها می باشد و $q_j = (\sqrt{\varepsilon_j}/\sqrt{\mu_j})\sqrt{1-(\sin^2\theta/\varepsilon_j\mu_j)}$. بنابراین ماتریس انتقال کل برای نانوبلور فوتونی دو لایه مورد مطالعه عبارتست از:

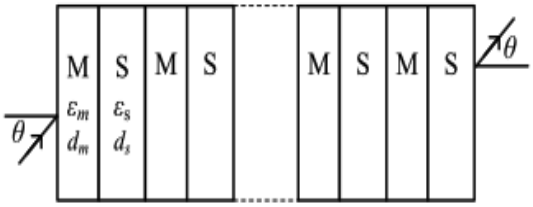
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

$$M = (M_1 M_2)^N \quad (۴)$$

که در آن M_1 ماتریس انتقال مربوط به لایه فرامادہ و M_2 ماتریس انتقال مربوط به لایه ابررسانا می باشد. تراگسیلندگی نانوساختار $T(\omega,r)=|t(\omega,r)|^2$ مطابق رابطه زیر وابسته به عناصر ماتریس انتقال کل ساختار مبی باشد.

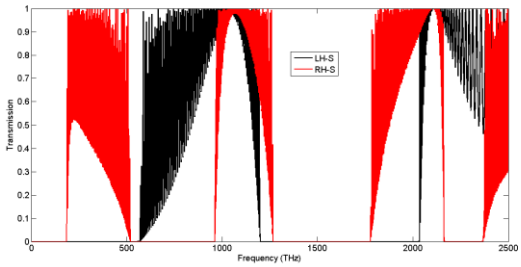
$$t(\omega,r)=\frac{2}{(M_{22}+M_{11})-i(M_{12}+M_{21})} \quad (۵)$$



شکل ۱: نانوبلور فوتونی ابررسانا شامل فرامادہ $(M\text{-}S)^N$

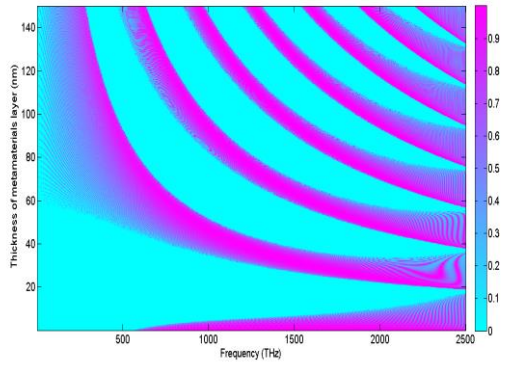
۳- بحث و نتایج

نانوساختار لایه ای $(M\text{-}S)^N$ متشکل از N=100 تناوب دوتایی لایه ابررسانا-لایه فرامادہ مطابق شکل ۱ در نظر می گیریم. لایه ابررسانا را از جنس Nb با ضخامت $d_s = 60\,nm$ انتخاب کردیم که دمای بحرانی آن $T_C = 9.2\,K$ و عمق نفوذ لاندن آن $\lambda_0 = 83.4\,nm$ می باشد. لایه های فرامواد در نانوساختار را بدون اتلاف و با ضخامت $d_m = 45\,nm$ در نظر گرفتیم. فرض کردیم ضریب گذردهی الکتریکی لایه های فرامادہ $\varepsilon_m = -10$ و ضریب تراوایی آنها $\mu_m = -1$ باشد.



شکل ۲: مقایسه طیف تراگسیل نانوبلور فوتونی ابررسانا $(D\text{-}S)^N$ با $(M\text{-}S)^N$

مطابق شکل ۲ با در نظر گرفتن ضخامت های معینی از لایه ابررسانا $d_s = 60\,nm$ ولایه فرامادہ $d_D = 45\,nm$، طیف تراگسیل نانوساختار لایه ای را در دمای اعمالی $T = 4.2K$ رسم کردیم. گاف باندی درفرکانس های پایین و نیز گاف باند فوتونی در گستره طیفی $1200\text{-}2036\ THz$ مشاهده کردیم بار دیگر با جایگزینی دی الکتریکی بجای فرامادہ با همان ضخامت طیف را رسم کردیم. نتیجه گرفتیم که نانوساختار مورد مطالعه فرکانس قطعی در حوالی $190(THz)$ دارد و همچنین علاوه بر گافی که در فرکانس های پایین ظاهر شده سه گاف باند براگ نیز دارد. که یکی از گاف باند ها همپوشانی خوبی با گاف حاصل از نانوبلور فوتونی ابررسانا شامل فرامادہ دارد این گاف در گستره $1266-1776(THz)$ قرار دارد.



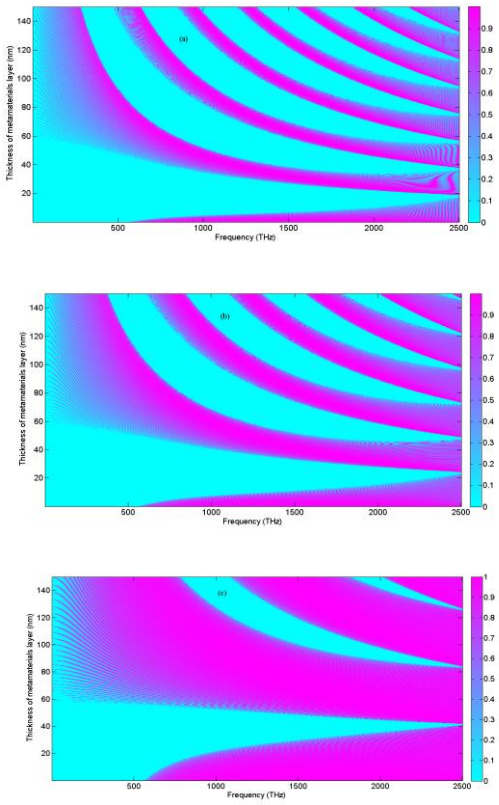
شکل ۳: تاثیر ضخامت فرامادہ در طیف تراگسیل نانوبلور فوتونی ابررسانا شامل فرامادہ

با توجه به منشا گاف های فوتونی در بلورهای فوتونی به نظر می رسد که ضخامت فرامواد گاف های فوتونی را تحت تاثیر قرار دهد بنابراین به ازای ضخامت های مختلف فرامواد طیف تراگسیل نانوبلور فوتونی را مطابق شکل ۳ رسم کردیم و تغییرات عمده ای را در مقدار فرکانس قطع ساختار و نیز گستره طیفی گاف بر حسب تغییرات ضخامت فرامواد مشاهده کردیم طوری که با کاهش ضخامت فرامواد تا 20nm، فرکانس قطع تا حوالی 2300THz جابجا می شود و گاف باند فوتونی دوم دیگر قابل مشاهده نیست در حالی که با افزایش ضخامت فرامواد تا 90 nm بر تعداد گاف ها افزوده می شود ضمن آنکه گاف اولی در حال ناپدید شدن است. بنظر می رسد افزایش ضخامت لایه فرامواد و به سبب آن تغییر اختلاف راه نوری منجر به تشکیل باند گاف های دیگر و نابودی گاف اول در طیف تراگسیل نانو بلور فوتونی می شود. به ازای سایر ضخامت ها، واضح است که با افزایش ضخامت فرامواد بر تعداد باند گاف ها افزوده می شود.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

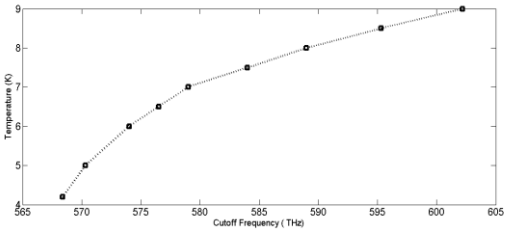
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

از خواص منحصر بفرد مواد می توان به ضریب شکست آنها اشاره کرد. بنابراین وابستگی طیف تراگسیل نانوبلور را به ضریب گذردهی فرامواد مطالعه کردیم و این وابستگی را مطابق شکل ۴ رسم نمودیم. ضخامت لایه ها را ثابت در نظر گرفتیم. تغییرات ضریب گذردهی فرامواد مشابه ضخامت آن، تاثیر عمده ای در تعداد و نیز فرکانس قطع نانو بلور فوتونی دارد. از آنجایی که پارامتر ضخامت و ضریب شکست دو پارامتر و مشخصه مهم بلورهای فوتونی است که از طریق رابطه براگ (که تعیین کننده محل گاف ها ی فوتونی در بلورهای فوتونی می باشد) در محل تشکیل گاف ها تاثیر گذار هستند. در واقع با تغییر ضریب گذردهی فرامواد، جنس لایه تشکیل دهنده بلور فوتونی عوض می شود طوری که بنظر می رسد که با نانوبلور فوتونی دیگری سروکار داریم.



شکل۴: تاثیر ضریب گذردهی فراماده در طیف تراگسیل نانوبلور فوتونی ابررسانا شامل فراماده^{N}(M-S) برحسب ضخامت فراماده الف) $\varepsilon_m=-10$ ب) $\varepsilon_m=-6$ و ج) $\varepsilon_m=-2$

از آنجایی که ضریب شکست لایه ابررسانا تابعی از دما می باشد برای بررسی تاثیر ضریب شکست لایه ابررسانای موجود در ساختار بر روی طیف تراگسیل نانوبلور فوتونی کافیست که دمای اعمالی را تغییر دهیم. بنابراین با در نظر گرفتن ضخامت های معین از لایه ابررسانا طیف تراگسیل نانوبلور فوتونی را بررسی کردیم. نمودار تغییرات فرکانس قطع نانو ساختار را بر حسب دمای اعمالی در شکل ۵ رسم کردیم که این تغییرات افزاینده هست.



شکل ۵: تاثیر دمای اعمالی در فرکانس قطع نانوبلور فوتونی

۴- نتیجه گیری

حضور فراماده در نانوبلور فوتونی ابررسانا باعث افزایش پهنای باند گاف های نانوساختار می شود طوری که در گستره $1266-1776(THz)$ باند گاف های این دو نانو ساختارها باهم همپوشانی دارند. علاوه بر آن فرکانس قطعی در چنین ساختارهایی وجود دارد که با افزایش ضریب گذردهی و ضخامت لایه های فرامواد بسمت فرکانس های کوچکتر جابجا می شود. اما بسته به پارامترهای مختلف نانوساختار، فرکانس قطع آنها در گستره $570-600(THz)$ رخ می دهد. نتایج نشان داد که با افزایش دمای اعمالی تا نزدیکی دمای بحرانی ابررسانا، فرکانس قطع نانو ساختار به سمت فرکانس های بالاتر جابجا می شود.

مراجع

[1] E. Yablonovich, “Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics”, Phys. Rev. Lett. 58, 2059-2062, 1987.
[2] S. John, “Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices”, Phys. Rev. Lett. 58, 2486-2489, 1987.
[3] V. G. Veselago, Sov. Phys. Uspekhi, 10, 1968.
[4] H. F. Zang, S. B. Liu and H. Yang, “Omnidirectional photonic band gaps in one-dimensional ternary superconductor-dielectric photonic crystals based on a new Thue-Morse aperiodic structure,” J. Supercond. Nov. Magn 27, 41-52, 2014.
[5] S. K. Srivastava, A. Aghzamali, “Study of optical reflectance properties in 1D annular photonic crystal containing double negative (DNG) metamaterials”, *Physica, B* 489, 67–72, 2016

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]