بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین
کنفرانس مهندسی و فناوری
فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

جایگزیدگی اندرسون در یک بلور فوتونی نامنظم پلاسمایی دارای الگوی چگالی الکترونی سینوسی

زهرا مهبودی[۱]، عباس قاسم‌پور اردکانی[۲]، مجتبی گلشنی[۱]
[۱] دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان ایران
[۲] دانشکده علوم، بخش فیزیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
zahramehboodi۷٤@gmail.com, golshani@uk.ac.ir, aghasempour@shirazu.ac.ir

چکیده - در این مقاله ما به بررسی جایگزیدگی اندرسون در یک ساختار لایه‌ای نامنظم شامل پلاسما که در آن چگالی الکترونی در هر لایه‌ی پلاسما به صورت سینوسی مدوله شده است، می‌پردازیم. با محاسبه‌ی طول جایگزیدگی بهنجار در فرکانس‌های مختلف نشان داده می‌شود که در بعضی از فرکانس‌ها سیستم در رژیم جایگزیده اندرسون قرار دارد. در انتها، اثر پارامترهای مختلف ساختار مانند قدرت بی‌نظمی، ضریب مدولاسیون و زاویه‌ی فرود بر طول جایگزیدگی بررسی شده است.

کلید واژه- جایگزیدگی اندرسون، بلور فوتونی پلاسمایی، چگالی الکترون سینوسی، ماتریس انتقال

Anderson Localization in a Disordered Plasma Photonic Crystal with Sinusoidal Electron Density

Zahra Mahboudi[۱], Abbas Ghasempour Ardakani[۲], Mojtaba Golshani[۱]
[۱] □□□□□□□□ □□ □□□□□□□□, □□□□□□□ □□□□□□□□ □□□□□□□□□□□□ □□ □□□□□□□, □□□□□□□, □□□□□
[۲] □□□□□□□□□□□□ □□ □□□□□□□□, □□□□□□□ □□□□□□□□□□□□, □□□□□□□, □□□□□
zahramehboodi۷٤@gmail.com, golshani@uk.ac.ir, aghasempour@shirazu.ac.ir

Abstract- In this paper, we investigate Anderson localization in a disordered layered structure in which the electron density of each plasma layer is sinusoidally modulated. Calculation of the normalized localization length at different frequencies, shows that the system is localized at some frequency ranges. Finally, the impact of different parameters such as disorder strength, modulation factor and incident angle on the localization length is investigated.

Keywords: Anderson Localization, Plasma Photonic Crystal, Sinusoidal Electron Density, Transfer Matrix

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

مقدمه

جایگزیدگی به معنای عدم انتشار امواج در یک محیط بی-نظم است که اولین بار در سال ۱۹۵۸ میلادی توسط فیزیکدان آمریکایی فلیپ وارن اندرسون مطرح شد. او حرکت اسپین‌ها و رسانایی الکتریکی را در یک شبکه‌ی تصادفی بررسی کرد. ماهیت جایگزیدگی ناشی از خاصیت موجی ذرات می‌باشد و یکی از پدیده‌های مربوط به انتقال کوانتومی همدوس است. به همین دلیل این پدیده در سیستم‌های نوری، صوتی و حتی اخیراً اتم‌های سرد نیز مشاهده شده‌است[۱]. هنگاهی که یک موج نوری وارد یک محیط بی‌نظم می‌شود (محیط بی‌نظم نوری محیطی است که ضریب شکست آن به صورت تصادفی تغییر می‌کند) مشروط بر اینکه درجه تصادفی بودن در شبکه به اندازه کافی بزرگ باشد، نور در آن محیط منتشر نمی‌شود.

بلورهای فوتونی پلاسمایی اولین‌بار توسط هوجو و ماسه در سال ۲۰۰۳ مورد مطالعه قرار گرفت[۲]. بلورهای فوتونی پلاسمایی ساختارهایی متناوب از لایه‌های میکروپلاسما و دی‌الکتریک و یا میکروپلاسما با چگالی‌های متفاوت هستند. بلورهای فوتونی پلاسمایی را می‌توان با اعمال میدان مغناطیسی خارجی یا با تغییر چگالی گازی که در تولید پلاسما مورد استفاده قرار می‌گیرد کوک یا کنترل کرد.

در زمینه‌ی جایگزیدگی اندرسون کارهای زیادی صورت گرفته‌است و پدیده‌ی جایگزیدگی در سیستم‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته‌است[۳]، اما جایگزیدگی اندرسون در یک بلور فوتونی پلاسمایی با ضریب شکست سینوسی تابحال مورد بررسی قرار نگرفته است. بلورفوتونی پلاسمایی با الگوی ضریب شکست سینوسی برای اولین بار در مقاله-ی[۳] مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در این مقاله اثر لایه‌ی نقص بر خواص طیف عبوری و انعکاسی این بلورها مطالعه شده‌است. حال در این مقاله فرض می‌کنیم که چگالی اولیه در لایه های پلاسمایی سینوسی که در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند به طور کاتوره ای تغییر کند و با استفاده از روش ماتریس انتقال به بررسی پدیده‌ی جایگزیدگی اندرسون در این ساختار می‌پردازیم همچنین اثر تغییر پارامترهایی نظیر قدرت بی‌نظمی، ضریب مدولاسیون و زاویه‌ی فرودی بر طول جایگزیدگی بررسی می‌شود و اثر چگالی اولیه‌ی تصادفی را بر طول جایگزیدگی مورد بررسی قرار می‌دهیم.

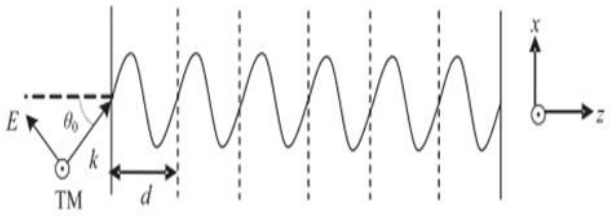
تئوری مسئله

سیستم مورد بررسی یک بلور فوتونی پلاسمایی یک بعدی با الگوی ضریب شکست سینوسی است که در شکل۱ طرحواره آن نشان داده شده‌است. چگالی الکترونی در طول بلور پلاسمایی به صورت رابطه ی ۱ در نظر گرفته شده است.

$$n_e = n_{e0}(1+K\sin\frac{2\pi z}{d}) \qquad (۱)$$

که در این رابطه n_{e0} چگالی پلاسمای اولیه، K ضریب مدولاسیون در طول محور z ، d دوره تناوب است. در این رابطه چگالی الکترون‌های داخل پلاسما به صورت تابع سینوسی در نظر گرفته‌شده است. با داشتن چگالی الکترون-ها، گذردهی الکتریکی در محیط را می‌توان با استفاده از مدل درود به دست آورد[۳].

برای اینکه جایگزیدگی اندرسون را در این سیستم بررسی کنیم فرض می‌شود که تعداد ۱۰۰ لایه‌ی پلاسمایی با چگالی سینوسی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند.



شکل۱- طرحواره‌ای از لایه‌های پلاسمایی یک بعدی با چگالی سینوسی

اما در اینجا برخلاف سیستم در نظر گرفته شده در مرجع[۳]، فرض می‌کنیم چگالی پلاسمای اولیه در لایه‌های پلاسمایی که در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند به صورت

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

تصادفی از رابطه‌ی $n_{ej}=n_{em}(1+\delta_j)$ تعیین می‌شود. n_{em} مقدار متوسط و δ_j یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه‌ی $[-q,q]$ است. q را قدرت بی‌نظمی گویند.

برای محاسبه طول جایگزیدگی از روش ماتریس انتقال استفاده می‌شود. ماتریس انتقال روشی است که دامنه‌ی میدان‌های ورودی و خروجی هر لایه از سیستم را به یکدیگر مرتبط می‌کند و برای هر لایه‌ی سیستم از آن استفاده می‌شود[۳]. با استفاده از روش ماتریس انتقال، ضریب عبور ساختار بی‌نظم طراحی شده برای فرکانس‌های مختلف محاسبه می‌شود. به این صورت که هر لایه‌ی پلاسمایی نشان داده شده در شکل۱ را به تعداد زیادی زیرلایه تقسیم کرده که تعداد آن نیز ۱۰۰ زیرلایه است و برای هر لایه ماتریس انتقال را نوشته و سپس در ماتریس انتقال لایه‌های دیگر ضرب کرده و ماتریس انتقال کل ساختار بی‌نظم را بدست می‌آوریم. با استفاده از ماتریس انتقال کل می‌توان ضریب عبور را بدست آورد[۳] حال با داشتن ضریب عبور T در فرکانس‌های مختلف f می‌توان طول جایگزیدگی را با استفاده از رابطه‌ی ۲ بدست آورد.

$$\xi(f)=-\frac{2L}{\langle \ln T(f)\rangle} \qquad (۲)$$

که در این رابطه L طول کل سیستم و $\langle \ln T(f)\rangle$ نشان دهنده‌ی میانگین‌گیری آنسامبلی روی حالات مختلف بی‌نظمی است. در این مقاله میانگین‌گیری بر روی ۱۰۰ نمونه تصادفی انجام شده است.

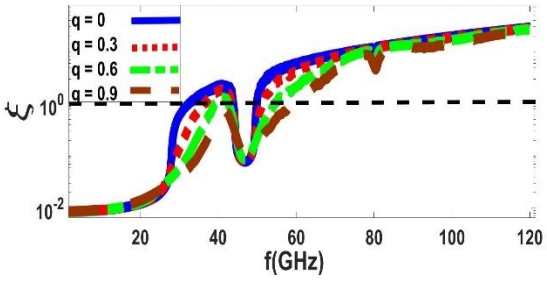
بحث و نتایج عددی

در این قسمت اثر پارامترهای مختلف را بر روی طول جایگزیدگی بررسی خواهیم کرد. پارامترهای عددی مورد استفاده در این مقاله به شرح زیر می‌باشد:

$$d=4000\mu m\ ,\ n_{em}=10(\mu m)^{-3}$$

ابتدا فرض می‌کنیم نور به صورت عمودی $(\theta=0)$ به ساختار بتابد. در شکل۲ نمودار طول جایگزیدگی بهنجار شده به طول سیستم بر حسب فرکانس در بازه‌ی صفر تا ۱۲۰ گیگا هرتز و به ازای مقادیر مختلف قدرت بی‌نظمی، در مقیاس لگاریتمی، نشان داده شده‌است.

همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود در اکثر فرکانس‌ها با افزایش قدرت بی‌نظمی طول جایگزیدگی کاهش می‌یابد. در شکل ۲ خط چین افقی مرز بین ناحیه‌ی جایگزیدگی و پخشی را نشان می‌دهد. در فرکانس‌هایی که طول جایگزیدگی بهنجار کمتر از یک باشد، سیستم در رژیم جایگزیده است. طول جایگزیدگی کمتر به مفهوم جایگزیده‌تر بودن نور در سیستم می‌باشد. در فرکانس‌های بالا، محیط نسبت به نور شفاف شده و جایگزیدگی در سیستم مشاهده نمی‌شود.

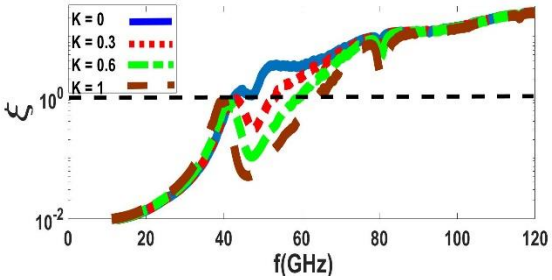


شکل۲- تغییر طول جایگزیدگی بهنجار بر حسب قدرت بی‌نظمی در تابش عمود

در شکل ۳ منحنی طول جایگزیدگی بهنجار برای مقدار ثابت بی‌نظمی $q=0.6$ و به ازای ضریب‌های مدولاسیون مختلف نشان داده شده‌است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار K طول جایگزیدگی کاهش می‌یابد. دلیل این افزایش تغییر در ضریب شکست نمونه و کاهش میزان عبور سیستم می‌باشد. بنابراین، در سیستم طراحی شده در اینجا می‌توان با افزایش ضریب مدولاسیون، میزان جایگزیدگی نور در ساختار را بهبود بخشید. لازم به ذکر است که در سیستم‌های اپتیکی جایگزیدگی بیشتر منجر به

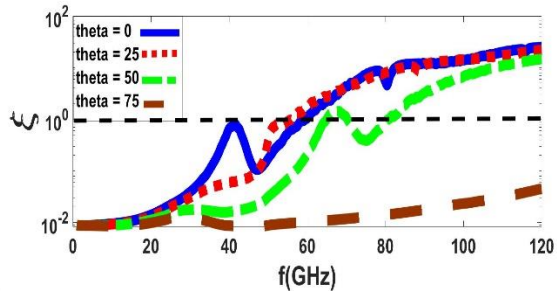
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

افزایش شدت نور و برهمکنش بیشتر نور با موادی که در ناحیه‌ی جایگزیده قرار می‌گیرند، می‌شود.



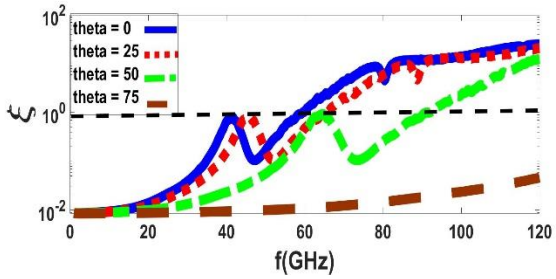
شکل۳- طول جایگزیدگی بهنجار به ازای ضریب‌های مدولاسیون مختلف در تابش عمود

در ادامه، اثر تغییر زاویه‌ی فرود را بر طول جایگزیدگی برای قطبش‌های TE , TM بررسی می‌کنیم. در شکل۴، اثر تغییر زاویه‌ی فرود بر طول جایگزیدگی اندرسون در $q = 0.6$ برای قطبش TE نشان داده شده‌است.



شکل ۴- تغییر طول جایگزیدگی به ازای زاویه‌های فرودی مختلف در قطبش TE

باتوجه به این شکل، با افزایش زاویه از صفر تا ۵۰ درجه دره‌ی موجود در منحنی جایگزیدگی به سمت فرکانس‌های بیشتر میل می‌کند ولی در زاویه‌ی ۷۵ درجه طول جایگزیدگی در تمام محدوده فرکانسی بررسی شده کوچکتر از یک است. بنابراین با تغییر زاویه‌ی فرود می‌توان طول جایگزیدگی و میزان جایگزیدگی در ساختار پیشنهاد شده را کنترل کرد.



شکل۵- طول جایگزیدگی به ازای زاویه فرودی مختلف در قطبش TM

در شکل۵ طول جایگزیدگی به ازای زاویه‌های فرود مختلف برای قطبش TM نشان داده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود در اینجا رفتار کلی شبیه به قطبش TE است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله طول جایگزیدگی اندرسون در یک سیستم نامنظم پلاسمایی با الگوی ضریب شکست سینوسی یک بعدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در بعضی از فرکانس‌ها سیستم در رژیم جایگزیده‌ی اندرسون است و با تغییر پارامترهای مختلف مانند قدرت بی‌نظمی، ضریب مدولاسیون و زاویه‌ی فرود می‌توان میزان طول جایگزیدگی را کنترل نمود.

مرجع‌ها

[۱] G. A. Luna-Acosta and F. M. Izrailev, N. M. Makarov, U. Kuhl and H.-J. Stöckmann, “One dimensional Kronig-Penney model with positional disorder: Theory versus experiment”, Phys. Rev. B, ۸۰, ۱۱۵۱۱۲, ۲۰۰۹.

[۲] H. Hitoshi, M. Atsushi, “Dispersion Relation of Electromagnetic Waves in One-Dimensional Plasma Photonic crystals”, J. Plasma Fusion Res. Vol۸۰, No۲, ۲۰۰٤

[۳] L. Qi, L. Shang, and S. Zhang, “One-dimensional plasma photonic crystals with sinusoidal densities”, Physics of Plasmas., Vol. ۲۱, pp. ۰۱۳۵۰۱, ۲۰۱٤

[٤] V. L. Ginzberg, The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasmas (Pergamon, New York, ۱۹۷۰

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