

گذار فاز توپولوژیک در سیستم انتقال حرارت تابشی زنجیره‌ای از نانوذرات hBN با حجم‌های

متناوب

بهمنی، فرزاد^۱؛ نیکبخت، مولاداد^۱

^۱دانشکده فیزیک دانشگاه زنجان، کیلومتر ۱۰ جاده قدیم زنجان تبریز

چکیده

در مطالعات اخیر سیستم‌های تابشی به عنوان بستر مناسبی برای مطالعات توپولوژیک و حالت‌های خاص آن مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این میان مدل کوانتومی انتقال الکترون زو-شریفر-هیگر^۱ (SSH) مورد توجه بیشتری برای سامانه‌های موجی قرار گرفته چرا که این زنجیره متناوب ساده‌ترین ساختار بروز دهنده حالت‌های توپولوژیک لبه‌ای است. در این مطالعه قصد ما بر این بوده که انتقال حرارت تابشی را در زنجیره‌ای از نانوذرات hBN که مطابق با هندسه SSH چیده شده‌اند مورد بررسی قرار داده و امکان بروز حالت‌های لبه‌ای و جایگزیدگی ویژه حالت‌های آنها را که از مهم‌ترین خصیصه‌های مورد توجه مطالعات فتونیک هستند تحقیق کنیم. رویکرد ما در این مقاله بر خلاف کارهای پیشین متمرکز بر کنترل حجم نانوذرات در جهت بروز گذار فاز توپولوژیک و مدیریت نسبت IPR^۲ به عنوان یک مشخصه میزان جایگزیدگی خواهد بود.

Topological phase transition in a radiative heat transfer system of hBN nanoparticles with staggered volumes

Bahmani, Farzam¹; Nikbakht, Moladad¹

¹ Department of Physics, University of Zanjan, 10 kilometers passed the old road of Zanjan-Tabriz

Abstract

In recent studies radiative systems have been considered as a suitable platform to investigate topological behavior and its unique features. The Su-Schrieffer-Heeger (SSH) model which is an electron hopping (quantum) model with staggered probability is a great candidate for wave systems due to its simplicity and the emergence of edge states. In our work we introduced a radiative system consisting of a chain of hBN nanoparticles which are formed in an SSH-like array with staggered volumes. We investigated the emergence of topological edge states and their localized eigenstates which are amongst the most interesting aspects of photonic researches. Our approach, contrary to prior work, is to control the volume of nanoparticles to witness the topological phase transition and maintaining IPR as a localization intensity indicator.

مقدمه

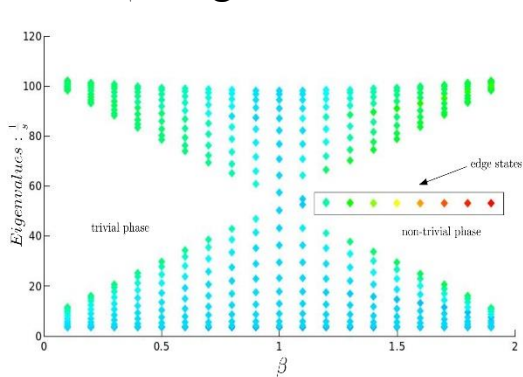
این رژیم تا چند مرتبه بزرگی بیشتر از معادل میدان دور آن خواهد بود که این افزایش به نفوذ امواج میرا علاوه بر امواج رونده نسبت داده می‌شود. از این رو مطالعه این رژیم با در نظر گرفتن جنس و هندسه‌های گوناگون و رفتارهای خاص مطابق با آنها مطلوب بسیاری از پژوهش‌های اخیر بوده است [۱].

انتقال حرارت به شیوه تابش در اجسام بزرگ-مقیاس در میدان دور از نظریه پلانک تبعیت می‌کند که متناسب با توان چهارم دمای جسم تابش کننده است و از حدی که به حد تابش جسم سیاه معروف است تجاوز نمی‌کند. این موضوع در رژیم انتقال حرارت میدان نزدیک متفاوت است. انتقال انرژی حرارتی میان اجسام در

^۱ Su-Schrieffer-Heeger

^۲ Inverse Participation Ratio

می توان به تحقیق اثر حجم و جایگزیدگی و انتشار میدان حرارتی در یک سامانه اشاره کرد. در این میان سعی بر تعریف هامیلتونی سیستم تابشی بر مبنای تئوری ماتریس پاسخ و یا معادله ویژه مقداری زمینه توجه به سیستم انتشاری را به عنوان یک سیستم کوانتومی فراهم می کند. تئوری ماتریس پاسخ که توسط نعیمی و نیکبخت ارائه شده پاسخ فرکانسی یک سیستم بس ذره ای از نانو ذرات را در حضور یک میدان ضعیف خارجی فرمول بندی می کند [۲]. همینطور در عدم حضور میدان خارجی می توان با خطی سازی معادلات دمایی و انتقال حرارت به یک معادله ویژه مقداری رسید که در آن هامیلتونی سیستم تعریف شده است [۳]. ماتریس پاسخ سیستم حالت کلی ماتریس هامیلتونی معادله ویژه مقداریست که در حضور منبع خارجی با فرکانس صفر به همان هامیلتونی ویژه مقداری تبدیل می شود. با این مقدمه فرمول بندی کار را شرح می دهیم.



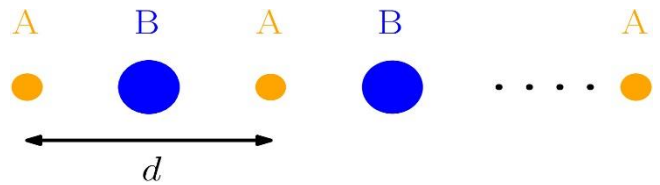
شکل ۳: طیف انرژی سامانه با تغییر ضریب β و حجم ذرات. IPR نشانگر شدت جایگزیدگی مدهاست.

تئوری و محاسبات

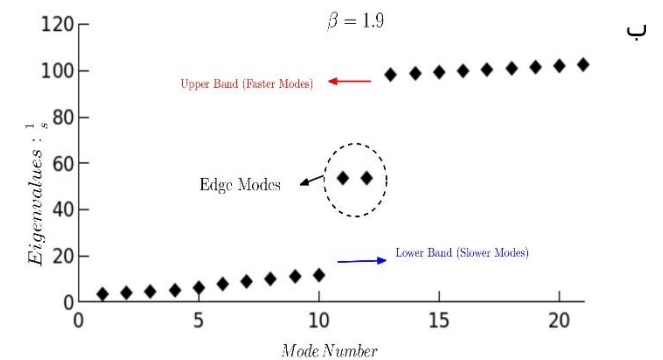
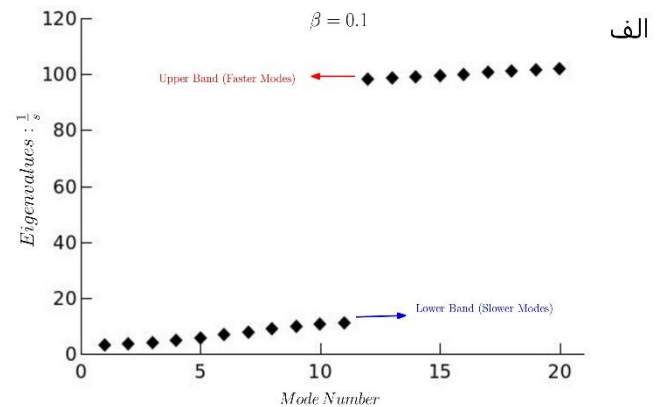
همانطور که خلاصه وار در بخش مقدمه ذکر شد ماتریس پاسخ سیستم بس ذره ای همان هامیلتونی مد نظر ماست است که در معرض منبع توان خارجی قرار ندارد. می دانیم تحول دمایی نانو ذرات به صورت زیر نوشته می شود:

$$c \frac{dT_i}{dt} = p_i \quad (1)$$

که در آن c ظرفیت گرمایی نانو ذرات hBN p_i توان اتلافی نانو ذره i ام و T_i دمای ذره i ام است و $(i=1,2,3,\dots,N)$. همینطور توان اتلافی از رابطه زیر:



شکل ۱: زنجیره یک بعدی از ۲۱ نانو ذره hBN با حجم های متناوب و فاصله ثابت d .



شکل ۲: ویژه مقدارهای سامانه در دو حالت الف) زیر شبکه A بزرگتر از B و ب) زیر شبکه B بزرگتر از A . ویژه مقادیر از جنس فرکانس (معادل طیف انرژی) هستند و سامانه در حالت ب بعد از گذار فاز توپولوژیک به حالت غیر بدیهی رسیده است.

مدل انتقال الکترون SSH که به وسیله تقریب نزدیک ترین همسایگی هامیلتونی یک زنجیره پلی استیلن را با احتمال انتقال متناوب در میان اتم ها توجیه می کند، ساده ترین نمونه تحقیق حالت های لبه ای و گذار فاز توپولوژیک است. این مدل در تحقیقات پیشین مورد بررسی توپولوژیک در سامانه انتقال حرارت تابشی قرار گرفته [۴،۵] و بستر بسیاری دیگر از جنبه های مطالعه نشده می باشد که از میان آنها

که پاسخ فرکانسی مرتبه اول سیستم است و در عدم حضور میدان خارجی درایه‌های روی قطر اصلی $\Omega = 0$ (فرکانس منبع فرودی) حقیقی خواهند شد. G_{ij} رسانش تابشی بین دو نانو ذره است که بر ظرفیت گرمایی نانو ذره i ام تقسیم شده و مستقیماً از رابطه $c^{-1} \frac{\partial \phi_{ij}}{\partial T}$ حاصل می‌شود [۲]. سامانه با در نظر گرفتن حجم یکسان نانو ذرات هم‌جنس یک هامیلتونی هرمیتی را به ما می‌دهد که مشاهده حالت لبه‌ای در آن ممکن نیست. به همین دلیل با ارائه یک سامانه که حجم ذرات به صورت متناوب تغییر می‌کنند می‌توان تقارن سامانه را بر هم زد و هامیلتونی سامانه را به غیر هرمیتی تبدیل کرد. اگر حجم ذرات از رابطه $V = \frac{4}{3}\pi R^3$ تبعیت کند که در آن شعاع از روابط $R = \sqrt[3]{50^3 \times \beta}$ و $R = \sqrt[3]{50^3 \times (2 - \beta)}$ نوشته می‌شود، شرط شکسته شدن تقارن سامانه و غیر هرمیتی شدن هامیلتونی که برای گذار فاز توپولوژیکی الزامی است اقلان می‌شود. در روابط بالا β ضریب برای کنترل حجم ذرات سامانه برای گذار از فاز توپولوژیک بدیهی به غیر بدیهی است. همینطور برای مطالعه شدت جایگزیدگی از کمیت IPR استفاده می‌کنیم که به صورت زیر تعریف شده:

$$IPR = \frac{\sum_{i=1}^N |\psi_{\mu}(x_i)|^4}{\left[\sum_{i=1}^N |\psi_{\mu}(x_i)|^2\right]^2} \quad (3)$$

که در آن $\psi_{\mu}(x_i)$ مقدار مولفه ویژه بردار در محل ذره i است که به عنوان وزن مد شماره μ روی ذره مورد نظر تعبیر می‌شود.

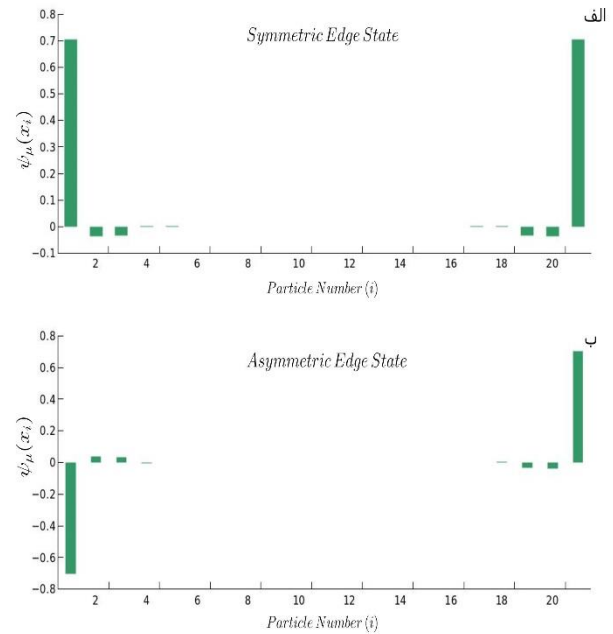
نتایج و بحث

در این سامانه ما مجموعه‌ای متشکل از ۲۱ نانو ذره hBN در نظر می‌گیریم. مطابق شکل ۱ این نانو ذرات در طول یک زنجیره یک بعدی با فاصله ثابت بین دو سلول واحد $d = 500 \text{ nm}$ که از دو زیرشبکه A و B تشکیل شده قرار می‌گیرند. تعداد فرد نانو ذرات در این سیستم از جمله خصائص این مطالعه است که با توجه به جفت بودن ذرات زیرشبکه، بروز گذار فاز توپولوژیک را در این سامانه قابل توجه می‌کند. سامانه‌های پیشنهادی [۴،۵] این امکان را جز با زوج بودن ذرات کل سامانه برای بروز حالت لبه‌ای توپولوژیک مبتنی بر لبه فیزیکی مقدور نمی‌سازند. با تغییر ضریب β حالت‌های لبه‌ای در زنجیره مطابق شکل ۲ برای دو β متفاوت بروز می‌کنند. زنجیره

$$p_i = \sum_{j=1}^N \int_0^{\infty} d\omega \tau_{ij}(\omega) [n(\omega, T_j) - n(\omega, T_0)]. \quad (2)$$

بدست می‌آید که در آن:

τ_{ij} ضریب انتقال حرارت تابشی بین ذره i ام و j ام، ω فرکانس $n(\omega, T)$ توزیع بوز-اینشتین هستند.



شکل ۴: ویژه حالت‌های سامانه در حالت لبه‌ای $\beta = 1.9$ (الف) ویژه حالت متقارن و (ب) ویژه حالت پاد-متقارن. جایگزیدگی حالت‌ها که با وزن آن‌ها در ذرات لبه‌ای نشان داده شده‌اند تصدیق کننده ضریب IPR حالت لبه‌ای است.

با خطی سازی رابطه توان اتلافی (جایگزین کردن رابطه ۲ در رابطه (۱) حول دمای محیط (دمایی که نانو ذرات در حالت تعادل به آن میل می‌کنند T_0) می‌توان توان اتلافی را از معادله حذف کرد و رابطه ویژه مقداری را به صورت زیر بدست آورد [۳]:

$$\frac{d}{dt} T(t) = -\hat{H}T(t) \quad (3)$$

در این معادله \hat{H} هامیلتونی زنجیره است.

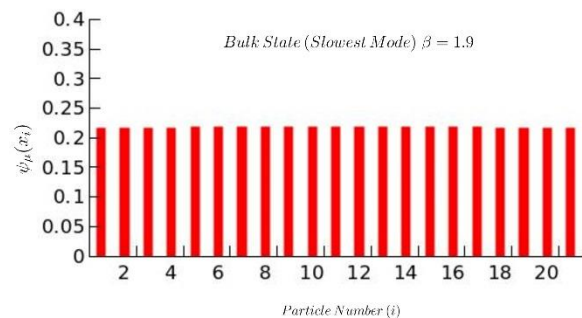
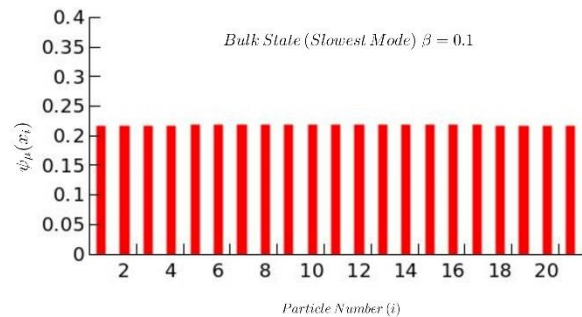
درایه‌های \hat{H} در حالت کلی به صورت زیر است:

$$\hat{H} = \begin{bmatrix} i\Omega - G_{11} & -G_{12} & \dots & -G_{1N} \\ -G_{21} & i\Omega - G_{22} & \dots & -G_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -G_{N1} & -G_{N2} & \dots & i\Omega - G_{NN} \end{bmatrix}$$

در $\beta = 1.9$ و $\beta = 0.1$ دو باند بالا و پایین انرژی را تشکیل داده و مطابق شکل دو ویژه مقدار تبهگن در $\beta = 1.9$ بروز می‌کند.

با توجه به تعریف مسئله $\beta < 1$ نشان‌گر فاز بدیهی و $\beta > 1$ نشان‌گر فاز غیر بدیهی سامانه است و در $\beta = 1$ (شعاع همه ذرات برابر) دو باند بالا و پایین به هم رسیده و حالت بدون گپ در طیف انرژی (ویژه مقادیر) سامانه پدید می‌آید که در شکل ۳ مشخص است.

همین‌طور در شکل ۳ متغیر IPR با مقیاس رنگی برای نشان دادن شدت جایگزیدگی ویژه مقدارها که هرکدام نشان‌گر یک مد انتقال حرارت سامانه هستند، مشخص شده است. بیشینه مقدار ممکن برای این متغیر $IPR \leq 0.5$ می‌باشد که برای حالت لبه‌ای $\beta = 1.9$ مشاهده می‌شود و نشان از جایگزیدگی حداکثری این مد لبه‌ای در سامانه است.



شکل ۵: ویژه حالت‌های سامانه در حالت الف) بدیهی $\beta = 0.1$ در مقایسه با ب) غیر بدیهی $\beta = 1.9$. برای مقایسه بهتر کندترین ویژه حالت انتقال حرارت برای هر دو سامانه در حالت توده‌ای در نظر گرفته شده است.

در شکل ۴ ویژه حالت‌های متناظر با مدهای لبه‌ای در $\beta = 1.9$ نشان داده شده‌اند که جایگزیدگی وزن مدها در ابتدا و انتهای سامانه

در آن‌ها دیده می‌شود. این نمودار تصدیق‌کننده شدت جایگزیدگی پیش‌بینی شده توسط نسبت IPR است.

همین‌طور مقایسه بین دو مد غیر لبه‌ای تصادفی در شکل ۵ در دو حالت $\beta = 0.1$ و $\beta = 1.9$ نشان از همسان بودن دینامیک انتظاری سامانه در فاز بدیهی و غیربدیهی دارد، اگر مد انتخابی متناظر با حالت لبه‌ای نباشد. در این حالت ما برای معتبر بودن مقایسه، کندترین مد سامانه را در هر دو فاز بدیهی و غیربدیهی انتخاب کرده‌ایم.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه امکان گذار فاز توپولوژیک و بروز حالت‌های لبه‌ای در یک سامانه تابشی تحقیق شد. مدهای انتقال حرارت با کنترل حجم نانوذرات مطابق با شبکه SSH در حالت‌های بدیهی و غیربدیهی نشان‌گر بروز حالت‌های خاص توپولوژیک بدون گپ و لبه‌دار جایگزیده هستند. میزان جایگزیدگی این مدها بسته به هندسه سامانه و حجم زیرشبکه‌های آن می‌تواند تا مقدار ۰.۵ هم افزایش پیدا کند که مطلوب‌ترین مقدار برای جایگزیدگی یک مد می‌تواند قلمداد شود. همین‌طور نشان داده شد که ویژه حالت‌های متناظر با لبه توپولوژیک روی ذرات ابتدایی و انتهایی سامانه بیشترین وزن را می‌توانند داشته باشند در حالی که عملاً ذرات توده نقشی در انتقال انرژی ندارند. مدهای توده‌ای چه در حالت بدیهی و چه در حالت غیر بدیهی عملکرد نسبتاً مشابهی دارند مادامی که در یک رده همسان از نظر بزرگی (سرعت میرا شدن) مقایسه شوند.

مرجع‌ها

- [۱] S.-A. Biehs, R. Messina, P. S. Venkataram, A. W. Rodriguez, J. C. Cuevas, and P. Ben-Abdallah, *Rev. Mod. Phys.* **93**, 025009(2021).
- [۲] A. Naeimi and M. Nikbakht, *Phys. Rev. B* **104**, 024301(2021).
- [۳] S. Sanders, L. Zundel, W. J. M. Kort-Kamp, D. A. R. Dalvit, and A. Manjavacas, *Phys. Rev. Lett.* **126**, 193601 (2021).
- [۴] A. Ott and S.-A. Biehs, *Phys. Rev. B* **102**, 115417 (2020).
- [۵] A. Ott, Z. An, A. Kittel, and Svend-Age Biehs, *Phys. Rev. B* **104**, 165407(2021).

