

Research Paper

Influence of Thermal Fluctuation on Attractive and Repulsive Casimir Forces in Microsystem with Topological Insulator Material¹

Zahra Nasiri^{*2}, Motahareh Aali³ and Fatemeh Tajik⁴

Received: 2023.12.08

Revised: 2024.01.27

Accepted: 2024.03.13

Abstract

Here, we explore the sensitivity of the Casimir force between two topological insulator plates on thermal fluctuation using weak and strong magnetizations on the surface of plates via Lifshitz theory. Thermal fluctuations between two plates made of topological insulators in vacuum lead to attractive interactions. By considering a weak magnetization, the influence of thermal fluctuations becomes stronger compared to the magnetoelectric effect in the regime of large separations which leads to generating the strong attractive Casimir force. Moreover, by considering strong magnetizations it is observed that thermal effects cannot make a change in the attractive and repulsive Casimir forces, and magnetoelectric effect determines both the magnitude and direction of Casimir forces. In the range of small magnetization, thermal effects have a significant effect on the repulsive Casimir force. It has been shown that at high temperatures, repulsive interaction due to antiparallel magnetization becomes weak, so that they disappear by increasing the separation.

Keywords: *Casimir Force, Topological Insulator, Thermal Effects.*

¹ <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.45814.1374>

² M. Sc. Student, Department of Condensed Matter Physics, Faculty of Physics, Alzahra University, Tehran, Iran. (Corresponding Author) Email: z.nasiri@student.alzahra.ac.ir

³ M. Sc. Graduated, Department of Condensed Matter Physics, Faculty of Physics, Alzahra University, Tehran, Iran. Email: aali.mot1993@gmail.com

⁴ Assistant Professor, Department of Condensed Matter Physics, Faculty of Physics, Alzahra University, Tehran, Iran. Email: f.tajik@alzahra.ac.ir

<https://jap.alzahra.ac.ir>



بررسی تاثیرات دمایی بر روی نیروی کاسیمیر جاذبه و دافعه در یک میکروسیستم ساخته شده از عایق‌های توپولوژیک^۱ زهرا نصیری*^۲، مطهره عالی^۳ و فاطمه تاجیک^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۳

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال چهاردهم، پیاپی ۳۷، تابستان ۱۴۰۳

صص ۱۲۸ - ۱۴۴

چکیده:

در این مطالعه حساسیت نیروی کاسیمیر نسبت به افت و خیزهای دمایی میان دو صفحه از جنس عایق توپولوژیک با در نظر گرفتن اعمال مغناطش‌های ضعیف و قوی روی سطح دو صفحه با استفاده از نظریه لیفشیتز بررسی شده است. افت و خیزهای دمایی میان دو صفحه از جنس عایق توپولوژیک در حلال منجر به برهمکنش‌های از نوع جاذبه می‌شوند. حال با اعمال مغناطش ضعیف مشاهده شده است، با افزایش فاصله بین صفحات تاثیر افت و خیزهای دمایی بر روی نیرو، از اثر مغناطش و مگنتوالکتریک بیشتر بوده و منجر به قدرت گرفتن نیروی کاسیمیر جاذبه می‌شود. همچنین با اعمال مغناطش‌های بزرگ مشاهده می‌شود، اثرات دمایی نمی‌توانند تغییری بر روی نیروی کاسیمیر جاذبه و دافعه ایجاد کنند و عامل مشخص کننده قدرت و جهت نیرو، اثر مگنتوالکتریک و جهت مغناطش اعمالی دو صفحه نسبت به هم است. در بازه مغناطش‌های کوچک اثرات دمایی بر روی نیروی کاسیمیر دافعه تاثیر قابل توجهی دارند. همچنین، مشاهده شد که در دمای بالاتر با اعمال مغناطش پادموازی روی صفحات اندرکنش دافعه به سرعت ضعیف شده و در فواصل بزرگ تر سهم نیروی دافعه به صفر میل می‌کند.

واژگان کلیدی: نیروی کاسیمیر، عایق توپولوژیک، اثرات دمایی.

^۱ <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.45814.1374>

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک ماده چگال، دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران. (نویسنده مسئول). Email: z.nasiri@student.alzahra.ac.ir

^۳ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه فیزیک ماده چگال، دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران. Email: aali.mot1993@gmail.com

^۴ استادیار، گروه ماده چگال، دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران. Email: f.tajik@alzahra.ac.ir



۱. مقدمه

در دنیای امروز با فراهم شدن پیشرفت در ساخت قطعاتی با ابعاد میکرو و نانو استفاده از این وسایل با نام سامانه‌های میکروالکترومکانیکی و نانوالکترومکانیکی بسیار رو به افزایش است و همین امر سبب می‌شود دانش و اطلاعات در حوزه نانو فناوری روز به روز در حال گسترش و تکامل باشد [۱-۳]. کاربرد بسیار وسیع میکروسامانه‌ها چون میکروسویچ‌ها، میکروروباتیک‌ها و میکروسنسورها [۴-۵] سبب شده است تا پژوهشگران توجه ویژه‌ای هم در بخش نظری و هم در بخش صنعتی به این حوزه داشته باشند [۶]. از جمله نیروهای تاثیرگذار و مهمی که در این سامانه‌ها پدیدار می‌شود، نیروی کاسیمیر است. از آنجا که این نیرو می‌تواند حتی در نوسانات نقطه صفر انرژی با استفاده از افت وخیزهای امواج الکترومغناطیسی خلاء حضور داشته باشد، بنابراین جزو نیروهایی به شمار می‌آید که همواره حضور دارند و هیچ‌گاه اثرات آن‌ها در ابعاد میکرو و نانو قابل چشم‌پوشی نیست [۷-۸]. از این رو مطالعه شناخت اثرات نیروی کاسیمیر بر روی دینامیک میکروسامانه‌های مختلف با شرایط محیطی متفاوت از اهمیت بالایی برخوردار است [۱-۲].

در سال ۱۹۴۸ هندریک کاسیمیر دانشمند هلندی با ایجاد شرایط مرزی برای امواج الکترومغناطیسی در خلاء توسط دو صفحه موازی رسانا کاملاً ایده‌آل به دور از زبری و برانگیختگی‌های دمایی، متوجه نیرویی از جنس جاذبه ($F_{\text{cas}} = \frac{\pi^2 \hbar c}{240d^4}$) بین صفحات شد که به افتخار او نیروی کاسیمیر نام گرفت [۹]. در رابطه بالا \hbar ثابت پلانک، c سرعت نور و d فاصله بین دو صفحه را بیان می‌کنند. بعدها لیفشیتز و همکارانش حضور این نیرو را در مواد حقیقی (موادی که رسانای کامل نیستند) بررسی کردند. آن‌ها در مطالعات خود از تئوری اتلاف-افت و خیز بهره بردند [۱۰]. به موجب این نظریه، موج الکترومغناطیسی جذب شده توسط سطوح سامانه سبب ایجاد حرکت و افت وخیز ذرات در داخل ماده می‌شود و نشان دادند که ویژگی‌های اتلافی صفحات (جذب اپتیکی با استفاده از بسیاری از دو قطبی‌ها) وابسته به افت وخیزهای امواج الکترومغناطیسی درون صفحات است. از این رو، لیفشیتز توانست رشد نیروی کاسیمیر را با انتخاب ماده مناسب تحت کنترل در آورد. همچنین، روش مورد استفاده او توانست بررسی تاثیر افت وخیزهای دمایی بر روی رشد نیروی کاسیمیر را نیز امکان‌پذیر سازد [۱۱].

بر اساس یافته‌های لیفشیتز ویژگی‌های اپتیکی اجزا تشکیل دهنده میکروسامانه تاثیر بسیار مهمی بر روی اندازه نیروی کاسیمیر دارند، به عنوان مثال، اگر رسانندگی اجزا ضعیف باشد نیروی کاسیمیر رشد چندان بزرگی نخواهد داشت [۱۱]. همچنین این امکان وجود دارد که با انتخاب ماده مناسب

بتوان حتی جنس نیروی کاسیمیر را از جاذبه به دافعه تغییر داد و بزرگی آن را با اعمال شرایط محیطی مناسب تحت اختیار گرفت [۱۲-۱۷]. بر اساس یافته‌های پیشین در میکروسامانه‌ها هنگام نزدیک شدن فاصله میان دو صفحه با رشد نیروی کاسیمیر جاذبه بین سطوح اجزا میکروسامانه، مواجه می‌شویم که سبب ایجاد اثر ناخواسته و نامطلوب چسبندگی اجزای میکروسامانه می‌شود و به کاهش شدید بازده آن می‌انجامد. بنابراین دستیابی به شرایطی که موجب شود جهت نیروی کاسیمیر از جاذبه به دافعه تغییر یابد بسیار شادی‌آفرین است [۱۸-۱۹]. عایق‌های توپولوژیک از جمله موادی هستند که با استفاده از آن‌ها می‌توان هم به نیروی کاسیمیر جاذبه و هم دافعه دست پیدا کرد [۱۲-۱۷]. این مواد در حجم نارسا هستند، در حالی که روی سطح ویژگی‌های مواد رسانا را از خود نشان می‌دهند.

در سامانه‌های ساخته شده با عایق‌های توپولوژیک [۲۰-۲۱]، شاهد پدیدار شدن اثری به نام مگنتوالکتریک هستیم که با کمک این اثر می‌توان جهت نیروی کاسیمیر یعنی جاذبه یا دافعه بودن آن را در سامانه کنترل کرد. بررسی‌های پیشین انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که اعمال مغناطش‌های موازی و پاد موازی روی سطح صفحات از جنس عایق‌های توپولوژیک در فواصل کوتاه، به ترتیب سبب ایجاد نیروی کاسیمیر جاذبه و دافعه می‌شوند و همچنین بزرگی نیروی کاسیمیر با افزایش قدرت مغناطش اعمالی و متعاقباً اثر مگنتوالکتریک افزایش می‌یابد [۱۴، ۱۵، ۱۷ و ۲۲]. با توجه به اینکه مطالعه نیروی کاسیمیر به عنوان یک نیروی همیشه موثر در دینامیک میکروسامانه‌ها بسیار مهم است، به منظور کاربردی بودن این مطالعات در صنعت، پژوهش‌های انجام شده با در نظر گرفتن شرایط محیطی صورت می‌پذیرد. یکی از عوامل تاثیرگذار بر روی نیروی کاسیمیر و عملکرد میکروسامانه‌ها افت و خیزهای دمایی محیط است. تا به حال تاثیر افت و خیزهای دمایی محیط بر روی بازدهی میکروسامانه‌های ساخته شده از عایق توپولوژیک مطالعه نشده است. در این مطالعه بررسی شده است که افت و خیزهای دمایی محیط چگونه می‌توانند بر بزرگی نیروی کاسیمیر جاذبه و دافعه تولید شده در سامانه تاثیرگذار باشند. همچنین مطالعه شده است که آیا تغییر قدرت اثر مگنتوالکتریک می‌تواند تاثیر افت و خیزهای دمایی را تغییر دهد. افزون بر این، نشان داده شده است که آیا قدرت افت و خیزهای دمایی با تغییر فاصله بین اجزای میکروسامانه تفاوتی پیدا می‌کند و آیا این تفاوت برای میکروسامانه‌ای با مغناطش‌های موازی و پادموازی یکسان است.



۲. روش کار

سامانه مورد مطالعه در کار پیشرو، دو صفحه از جنس عایق توپولوژیک (سلنید بیسموت) Bi_2Se_3 است که به صورت موازی در فواصل ۵۰ تا ۵۰۰ نانومتری از هم فرض شده است. در مطالعات انجام شده بر روی این دو صفحه موازی فاصله بین صفحات، خلاء در نظر گرفته شد. سپس دمای محیط شامل این میکروسامانه فرضی در سه دمای 100 K ، 200 K و 300 K (دمای اتاق) در نظر گرفته شد. همچنین، با در نظر گرفتن دو بازه ضعیف و قوی برای قدرت مغناطش اعمالی روی سطح صفحات، بررسی نیروی کاسیمیر جاذبه و دافعه در این میکروسامانه انجام شد. در این مطالعه بازه مغناطش ضعیف، آن محدوده مغناطش است که به ازای آن اثرات دمایی می توانند منجر به بروز تغییرات در اندازه نیروی کاسیمیر جاذبه و دافعه شوند. به همین ترتیب بازه مغناطش قوی نیز به گونه ای تعریف شده است که در محدوده اعمال آن برای سامانه، اثرات دمایی بدون اثرگذاری در تغییر قدرت نیروی کاسیمیر سامانه هستند.

در این مقاله با استفاده از نظریه لیفشیتز نیروی کاسیمیر جاذبه و دافعه در میکروسامانه ساخته شده از عایق توپولوژیک با در نظر گرفتن افت و خیزهای دمایی محیط محاسبه شده است. این محاسبات با کد نویسی توسط برنامه متلب انجام گرفته است. با استفاده از نظریه لیفشیتز انرژی کاسیمیر در واحد

$$E(d) = k_b T \sum_{n=0}^{\infty} \int \frac{d^2 q}{(2\pi)^2} \log \det [1 - R_1 \cdot R_2 e^{-2kd}] \quad (1)$$

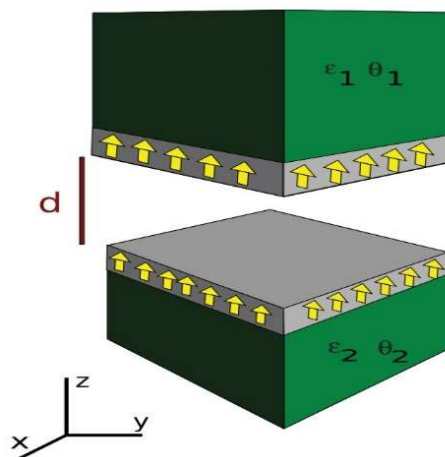
سطح با لحاظ نمودن تصحیحات دمایی به صورت رابطه (۱) است: $(F(d) = \frac{dE(d)}{dd})$ [۱۰]:

در این رابطه k_b ثابت بولتزمن، T دمای میکروسامانه، q بردار موج درون صفحات، $k = \sqrt{q^2 + \frac{\xi^2}{c^2}}$ بردار موج عمود بر صفحات، C ثابت نور و ξ فرکانس موهومی ماتسوبارا، $n=0, 1, 2, \dots$ $(\omega = i\xi = \frac{i2\pi k_b T n}{\hbar})$ است. علامت پریم بر روی جمع نیز به این معناست که جمله مرتبط با $n = 0$ دارای ضریب $\frac{1}{2}$ است. R_1 و R_2 نیز نمایش دهنده ماتریس بازتاب دو صفحه موازی هستند. درایه های قطری این ماتریس که با $r_{1,2}^p$ نشان داده می شوند ضرایب بازتاب فرنل برای سطوح داخلی صفحات ۱ و ۲ هستند، در این قالب $v = s$ و $v = p$ بیانگر قطبش الکتریکی عرضی (TE) و قطبش مغناطیسی عرضی (TM) است.

درایه قطری $r_{1,2}^S$ آن مولفه از موج الکتریکی بازتاب است که تنها ناشی از بخش الکتریکی موج تابیده است (تنها قطبش الکتریکی است) و درایه دیگر قطری $r_{1,2}^P$ آن مولفه از موج مغناطیسی بازتاب شده است که تنها ناشی از بخش مغناطیسی موج تابیده است (فقط مغناطش یا قطبش مغناطیسی است) [۱۱]. درایه‌های غیر قطری این ماتریس نیز با $r_{1,2}^{SP}$ نشان داده می‌شوند. با توجه به اینکه جنس صفحات در سامانه مورد نظر از عایق توپولوژیک است، و این ماده دارای ویژگی به نام اثر مگنتوالکتریک می‌باشد، حضور این اثر منجر به غیرصفر شدن درایه‌های غیر قطری ماتریس بازتاب می‌شود [۱۵، ۱۷]. یعنی این درایه‌ها ناشی از برهمکنش میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی موج الکترومغناطیسی هستند. $r_{1,2}^{SP}$ مرتبط با آن بخش از موج بازتابیده‌ای است که بخش الکتریکی موج تابیده شده به بخش مغناطیسی تبدیل گشته و بازتاب شده است و $r_{1,2}^{PS}$ مرتبط با آن بخش از موج بازتابیده‌ای که بخش مغناطیسی موج تابیده شده به بخش الکتریکی تبدیل گشته و بازتاب شده است. لازم به بیان است که اگر اثر مگنتوالکتریک در سامانه‌ای وجود نداشته باشد، ماتریس بازتاب صفحات به صورت قطری نوشته می‌شود یعنی درایه‌های غیرقطری برابر با صفر هستند [۱۵].

همچنین با حضور اثر مگنتوالکتریک، شرایط پیوستگی روی مرز در معادلات ماکسول با تغییراتی مواجه می‌شود به صورتی که در هر دو صفحه برای میدان مغناطیسی رابطه $H_i = (\mu)_{ij}^{-1} B_j - \frac{\theta\alpha}{\pi} E_i$ و برای بردار جابه‌جایی الکتریکی $D_i = \epsilon_{ij} E_j + \frac{\theta\alpha}{\pi} B_i$ را خواهیم داشت. کمیت α نشان‌دهنده ثابت ساختار ریز با مقدار عددی $(\frac{1}{137})$ است. جملات دوم سمت راست در هر دو رابطه مربوط به اثر مگنتوالکتریک است [۱۵، ۲۲]. کمیت کوانتیزه θ نیز نشان‌دهنده قدرت مغناطش روی صفحات است $(\theta = \pi(2n+1); (n \in Z))$ [۱۵]. همچنین در روابط بالا μ بیانگر تراوایی مغناطیسی و ϵ نیز نمایش‌دهنده تابع دی‌الکتریک اجزا سامانه است که در محاسبه نیروی کاسیمیر از راه نظریه لیفشیتز بخش موهومی تابع دی‌الکتریک از اهمیت بالایی برخوردار است [۱۰].





شکل ۱ شماتیکی از صفحات موازی سامانه فرضی از جنس عایق توپولوژیک. جنس هر دو صفحه یکسان در نظر گرفته شده است ($\epsilon_1 = \epsilon_2$). صفحات به فاصله d از یکدیگر قرار دارند و سطح آن‌ها با یک لایه نازک از ماده فرو مغناطیس به ضخامت a پوشیده شده است ($a \ll d$). تغییر علامت $\theta_1 \times \theta_2$ را به عنوان معیاری برای تغییر علامت مغناطش صفحات می‌توان در نظر گرفت.

بر اساس مقالات گزارش شده پیشین بخش موهومی تابع دی‌الکتریک بر حسب فرکانس موهومی برای برای عایق توپولوژیک سلنید بیسموت به شکل رابطه (۴) نوشته می‌شود [۱۵]:

$$\epsilon(i\xi) = 1 + \frac{\omega_e^2}{\xi^2 + \omega_R^2 + \gamma_R \xi} \quad (2)$$

در این فرمول ω_e فرکانس قدرت نوسانی مولکول‌های صفحات، ω_R فرکانس تشدید ($\omega_R = 0.006942 \text{ eV}$) فرکانس موهومی و γ_R ضریب میرایی است که در این مطالعه از آن صرف نظر شده است [۱۵]. در این پژوهش بزرگی فرکانس نوسانی به فرکانس تشدید یعنی $\frac{\omega_e}{\omega_R} = 0.8$ در نظر گرفته شده است.

نکته بسیار مهم برای نوشتن تابع دی‌الکتریک سامانه، هدایت کردن توجه خود به ماهیت و ساختار منحصر به فرد عایق توپولوژیک است. عایق توپولوژیک ماده‌ای است که در سطح رسانا بوده و در حجم داخلی خود عایق است [۱۲-۱۷]. امر قطعی این است که برای بیان چنین ماده‌ای با یک تابع دی‌الکتریک احتیاج به از میان برداشتن تقارن معکوس زمانی است [۱۲-۱۷]. این مهم با اعمال یک میدان مغناطیسی یکنواخت با استفاده از پوشش سطح صفحات با یک ماده فرومغناطیسی در نظر گرفته شده است. این لایه به قدری نازک در نظر گرفته می‌شود که نیازی به وارد کردن

تابع دی‌الکتریک این لایه فرومغناطیسی در محاسبات نباشد. بنابراین استفاده از این لایه فرومغناطیسی سبب یکپارچه شدن ترازهای انرژی سامانه و فراهم شدن شرایط شرح سامانه با یک تابع دی‌الکتریک می‌شود.

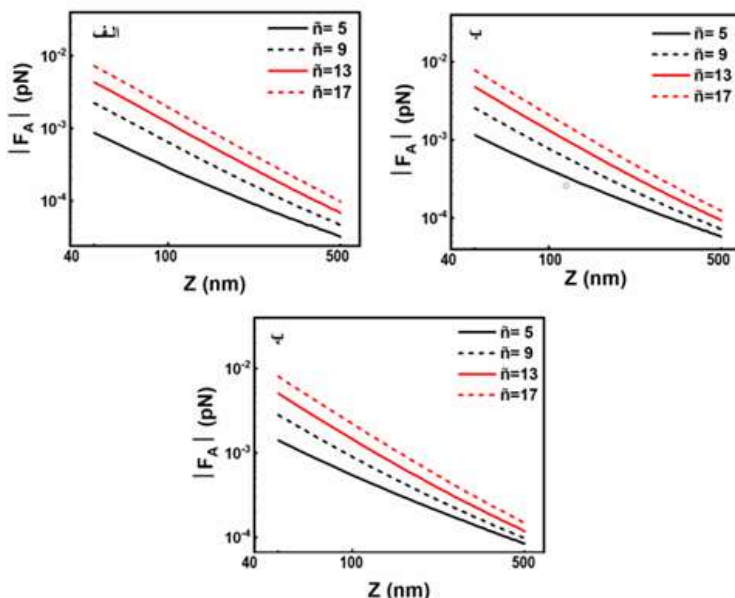
پدیدار شدن اثر مگنتوالکتریک سبب ایجاد تغییر در معادلات ماکسول شده و در نتیجه با تغییر در ماتریس بازتاب عایق توپولوژیک، هم بر روی ماهیت (جاذبه یا دافعه) نیروی کاسیمیر و هم بر روی اندازه و قدرت نیرو اثر می‌گذارد و به کمک این اثر می‌توان قدرت نیرو را تحت تنظیم و کنترل نیز داشت. در این پژوهش قدرت‌های مغناطش یکسان در هر دو صفحه را با در نظر گرفتن دو حالت هم جهت ($\theta_1 = \theta_2$) که نیروی کاسیمیر جاذبه را حاصل می‌کند و خلاف جهت یکدیگر ($\theta_1 = -\theta_2$) که سبب پدیدار شدن نیروی کاسیمیر دافعه می‌شود، بررسی می‌شود (شکل ۱) [۱۵، ۱۷].

۳. نتایج و بحث

۱.۳ اثر مغناطش‌های مختلف بر نیروی کاسیمیر جاذبه

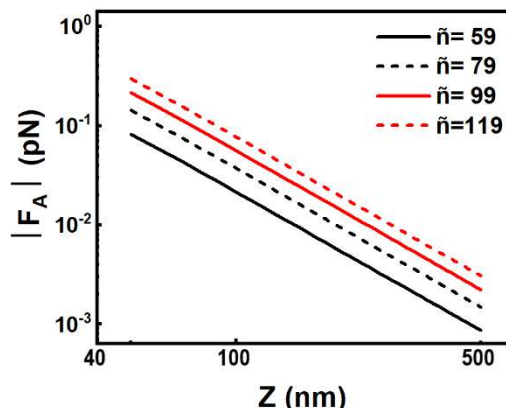
شکل‌های (۲) و (۳) بزرگی نیروی کاسیمیر جاذبه (F_A) نسبت به فاصله بین دو صفحه را برای مغناطش‌های کوچک و بزرگ را نشان می‌دهند. در این حالت جهت مغناطش روی سطح صفحات نسبت به هم موازی و هم اندازه فرض شده است. در هر دو شکل در سه قسمت (الف)، (ب) و (پ) شرایط متفاوت دمایی برای سامانه در نظر گرفته شده است. هدف بررسی وابستگی تأثیر مغناطش‌های متفاوت در سامانه و تغییر قدرت اثر مگنتوالکتریک نسبت به شرایط مختلف دمایی اعمال شده است. به صورت کلی با کاهش فاصله بین دو صفحه و افزایش قدرت مغناطش اعمالی، شاهد افزایش نیروی کاسیمیر هستیم. به عنوان مثال، به ازای مغناطش ۹ در دمای ۳۰۰ کلوین بین نیرو و فاصله صفحات، رابطه $F \approx Z^{-1.5}$ وجود دارد.





شکل ۲ بزرگی نیروی جاذبه نسبت به فاصله بین دو صفحه، در سه دمای (الف) ۱۰۰، (ب) ۲۰۰ و (پ) ۳۰۰ کلوین. مغناطش‌های اعمال شده روی سامانه در شکل نشان داده شده است.

در بازه مغناطش‌های کوچک با اعمال مغناطش‌های هم‌جهت یا موازی در سطح هر دو صفحه و به دنبال آن ایجاد نیروی کاسیمیر جاذبه (شکل (۲)) مشاهده می‌شود که افزون بر آن که با افزایش مغناطش بر بزرگی نیرو افزوده می‌شود خطوط نیرو مربوط به مغناطش‌های مختلف با افزایش فاصله به هم نزدیک می‌شوند. برای شرح آن می‌توان گفت چون در محدوده فاصله‌های بزرگ تر افت-وخیزهای دمایی قوی می‌شوند، در نتیجه بر روی نیرو تاثیر بیشتری دارند و می‌توانند بزرگی نیرو را تحت کنترل خود در آورند. با توجه به شکل (۲-ب) (دمای ۳۰۰ کلوین) افت‌وخیزهای دمایی به قدری قوی شده است که مشاهده می‌شود خطوط نیرو نسبت به دو قسمت (۲-الف) و (۲-ب) به هم بیشتر نزدیک شده‌اند و این رخداد به معنای ضعیف‌تر شدن اثر مغناطش در این بازه دمایی است. اگرچه، در فواصل کوچک که افت‌وخیزهای دمایی ضعیف هستند واکنش نمودارها به تغییر قدرت مغناطش در هر سه قسمت بسیار به هم شبیه هستند و عامل تاثیرگذار در این محدوده از فاصله، تغییر مغناطش سامانه است.



شکل ۳ بزرگی نیروی جاذبه نسبت به فاصله بین دو صفحه، در هر سه دمایی (۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کلوین). مغناطش‌های اعمال شده روی سامانه در شکل نشان داده شده است.

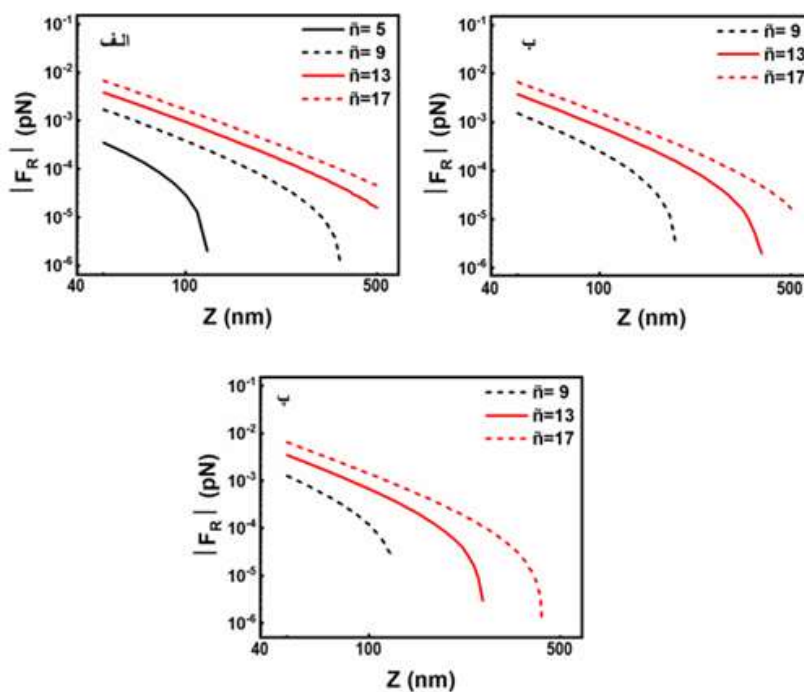
اگرچه مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن مغناطش‌های بزرگ‌تر هم‌جهت روی سطح صفحات و به دنبال آن ایجاد نیروی کاسیمیر جاذبه (شکل (۳))، با کاهش فاصله بین دو صفحه و افزایش قدرت مغناطش اعمالی، نیروی کاسیمیر افزایش یافته است. به عنوان نمونه، به ازای مغناطش ۷۹ در دمایی ۳۰۰ کلوین بین نیرو و فاصله صفحات رابطه $F \approx Z^{-0.7}$ وجود دارد. با توجه به شکل (۳)، روشن است در این محدوده مغناطش، تغییرات دمایی در تمام محدوده فاصله بین صفحات نمی‌توانند هیچگونه تغییر چشمگیری در نیرو ایجاد کنند. در اینجا قدرت مغناطش و اثر مگنتوالکتریک به اندازه‌ای قوی شده است که توانسته به اثرات افت‌وخیزهای دمایی بین دو صفحه (در هر سه محدوده دمایی اعمال شده) غلبه کند. از این رو، در این بازه مغناطشی نیروی کاسیمیر به گونه‌ای رفتار می‌کند که در همه محدوده‌های جدایی بین دو صفحه، بزرگی نیرو وابسته به بزرگی مغناطش است. به عبارتی تغییرات نیرو در این محدوده مغناطش به دمایی محیط وابسته نیست.

۲.۳ اثر مغناطش‌های مختلف بر نیروی کاسیمیر دافعه

در شکل‌های (۴) و (۵) نیز مقادیر مختلف مغناطش‌های پاد موازی در سطح هر دو صفحه با بزرگی یکسان، اعمال شده و به دنبال آن نیروی کاسیمیر دافعه ایجاد می‌شود. بزرگی نیروی کاسیمیر دافعه (F_R) نسبت به فاصله بین دو صفحه را به ترتیب در دو بازه مغناطشی ضعیف و قوی در سه دمایی متفاوت (الف) ۱۰۰، (ب) ۲۰۰ و (پ) ۳۰۰ کلوین) مطالعه خواهد شد.

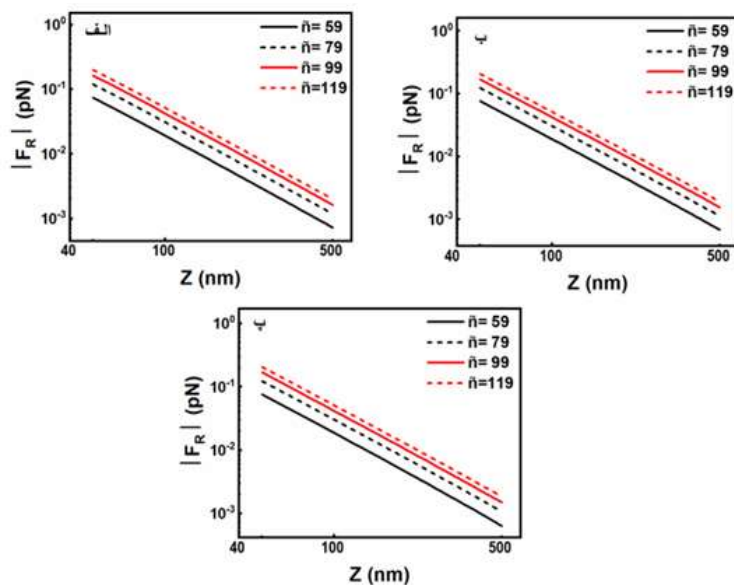


به صورت همه جانبه، نیروی دافعه کاسیمیر نیز همانند نیروی جاذبه کاسیمیر با کاهش فاصله بین صفحات و افزایش قدرت مغناطش روی سطح صفحات، بزرگ تر می شود. پیش از شرح، باید یادآوری کرد که افت و خیزهای دمایی بین دو صفحه از جنس عایق توپولوژیک در حلاء نیروی کاسیمیر از نوع جاذبه ایجاد می کنند که البته بزرگی آن با افزایش دما و تاثیر آن با افزایش فاصله بیشتر می شود [۲۳]. در بازه مغناطش های کوچک (شکل (۴)) دیده می شود با افزایش فاصله اثرات دمایی قدرت تاثیر بیشتری نسبت به اثر مغناطش اعمالی بر روی نیروی کاسیمیر دارند. با توجه به شکل (۴- الف) روشن است که اعمال هر چهار مغناطش مختلف منجر می شود سامانه برهمکنش دافعه ای از خود نشان دهد. اگرچه، به ازای مغناطش ضعیف تر و با رشد فاصله، بسیار سریع برهمکنش دافعه ای از بین می رود. این در حالی است که در شکل (۴- پ) (بالاترین دمای در نظر گرفته شده) سهم ایجاد برهمکنش دافعه برای کوچک ترین مغناطش در نظر گرفته شده در این پژوهش محو شده و محدوده برهمکنش دافعه ای برای مغناطش های بزرگ تر نیز به صورت محسوسی کاهش یافته است.



شکل ۴ بزرگی نیروی دافعه نسبت به فاصله بین دو صفحه، در سه دمای (الف) ۱۰۰، (ب) ۲۰۰ و (پ) ۳۰۰ کلوین. مغناطش های اعمال شده روی سامانه در شکل نشان داده شده است.

بنابراین به صورت کلی با توجه به نمودارهای شکل (۴) می‌توان گفت اثرات دمایی در بازه مغناطش‌های ضعیف، برای نیروی کاسیمیر دافعه تأثیر قابل ملاحظه‌ای داشته و با افزایش دما، افت و خیزهای دمایی هم نسبت به اثر مگنتوالکتریک بزرگ‌تر می‌شوند. به صورتی که در دمای بالاتر با اعمال مغناطش پادموازی اندرکنش دافعه به سرعت ضعیف شده و در فواصل بزرگ‌تر سهم نیروی دافعه نزدیک به صفر می‌گردد. اما نکته مهم این است که به ازای مغناطش‌های پادموازی به اندازه کافی قوی که منجر به نیروی کاسیمیر دافعه می‌شوند (شکل (۵))، اثرات دمایی مغلوب اثرات مگنتوالکتریک می‌شوند. از این‌رو، در اینجا نیز افزایش دما برای این بازه مغناطشی نمی‌تواند تغییر قابل توجهی را برای نیروی کاسیمیر دافعه ایجاد کند. به عبارت دیگر، واکنش نمودارها به تغییر قدرت مغناطش در هر سه قسمت با دماهای مختلف در نظر گرفته شده بسیار شبیه به هم هستند.



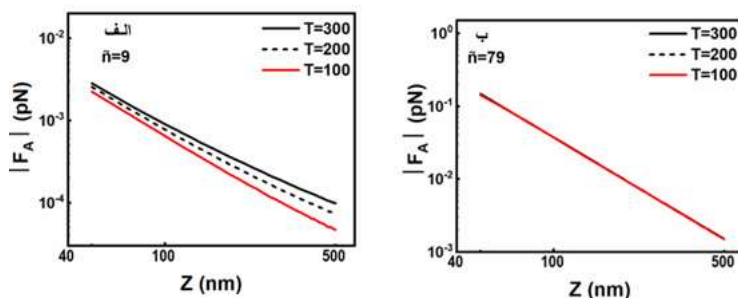
شکل ۵ بزرگی نیروی دافعه نسبت به فاصله بین دو صفحه، در سه دمای (الف) ۱۰۰، (ب) ۲۰۰ و (پ) ۳۰۰ کلوین. مغناطش‌های اعمال شده روی سامانه در شکل نشان داده شده است. (بازه مغناطش‌های بزرگ‌تر)



۳.۳ اثر افت و خیزهای دمایی بر نیروی کاسیمیر جاذبه و دافعه

شکل‌های (۶) و (۷)، بزرگی نیروی کاسیمیر جاذبه (F_A) و دافعه (F_R) نسبت به فاصله بین دو صفحه را با در نظر گرفتن دو مغناطش ویژه به ترتیب با قدرت ضعیف (الف) و قوی (ب) را نشان می‌دهند. در هر دو قسمت (الف) و (ب) بزرگی نیروی جاذبه و دافعه کاسیمیر در یک مغناطش ثابت نسبت به افزایش فاصله بین دو صفحه و با توجه به سه دمای در نظر گرفته شده، در حال کاهش است.

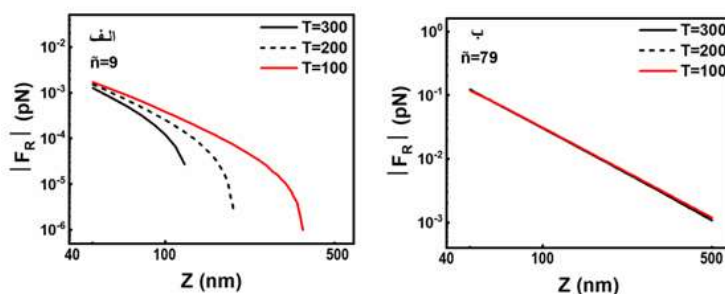
در شکل (۶)، با اعمال مغناطش‌های موازی روی سطح دو صفحه نیروی جاذبه کاسیمیر تولید شده است. در قسمت (الف) با در نظر گرفتن اعمال یک مغناطش ضعیف همسو به سطح صفحات و بررسی نیروی کاسیمیر جاذبه در سه دمای متفاوت مشاهده می‌شود که هرچه دمای سامانه بیشتر باشد، امکان ایجاد نیروی کاسیمیر جاذبه بزرگ‌تر در آن ایجاد می‌گردد. در فواصل کوتاه، بزرگی نیرو برای هر سه دما تفاوت قابل توجهی نداشته است. اگرچه، با افزایش فاصله در عین حال که نیروها در حال کاهش هستند اما نرخ تغییر و کاهش آن‌ها نسبت به هم متفاوت می‌شود. قابل توجه است که هرچه دما بیشتر باشد، روند کاهش نیروی کاسیمیر جاذبه ملایم‌تر است. به عبارت دیگر هرچه دما بالاتر باشد، نیرو با شیب خط کمتری نسبت به نیروی دماهای پایین‌تر کاهش می‌یابد.



شکل ۶ بزرگی نیروی جاذبه نسبت به فاصله بین دو صفحه، در دو مغناطش (الف) $\tilde{n} = 9$ و (ب) $\tilde{n} = 79$. دماهای متفاوت در نظر گرفته شده برای سامانه در شکل نشان داده شده است.

در نتیجه هر چند در فواصل کوتاه بین خطوط نیروهای جاذبه کاسیمیر در یک مغناطش ضعیف در دماهای متفاوت فاصله چندانی دیده نمی‌شود، اما در فواصل بزرگ‌تر خطوط نیرو به روشنی از هم فاصله گرفته‌اند و در فاصله بزرگ‌تر نیروی کاسیمیر جاذبه با دمای اعمالی کمتر اندازه کمتری دارد.

در شکل (۶-ب)، یک مغناطش ویژه قوی همسو به صفحات سامانه اعمال شده است. محاسبات نیروی کاسیمیر جاذبه برای هر سه دما به این نتیجه می‌انجامد که وقتی اثر مگنتوالکتریک به اندازه کافی بزرگ باشد، تغییر دما نمی‌تواند تغییری بر روی نیروی کاسیمیر جاذبه ایجاد کند و به ازای هر سه دما نیروهای یکسانی در فواصل مختلف بدست می‌آید که با افزایش فاصله به صورت کاملاً یکسان و منطبق بر هم کاهش می‌یابند.



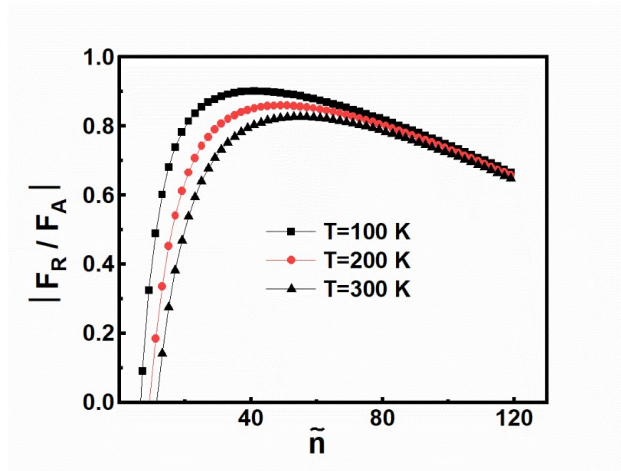
شکل ۷ تصویر بزرگی نیروی دافعه نسبت به فاصله بین دو صفحه، در دو مغناطش (الف) $\tilde{n} = 9$ و (ب) $\tilde{n} = 79$. دماهای در نظر گرفته شده برای سامانه در شکل نشان داده شده است.

در شکل (۷)، با اعمال مغناطش پادموازی روی سطح دو صفحه نیروی دافعه کاسیمیر ایجاد شده است. در قسمت (الف) برای یک مغناطش ضعیف پادموازی نیروی کاسیمیر دافعه به ازای سه دمای متفاوت رسم شده است. مشاهده می‌شود اگر اثر مگنتوالکتریک ضعیف باشد رفتار نیروی‌های دافعه کاسیمیر در سه دمای مختلف کاملاً با هم متفاوت است. در فواصل بسیار کوتاه بین دو صفحه هر سه نیروی دافعه کاسیمیر بدست آمده از دماهای مختلف اختلاف چندانی باهم ندارند. اما با افزایش فاصله بین صفحات، نیروی دافعه بدست آمده در حضور دمای بالاتر بسیار سریع‌تر افت کرده و به صفر میل می‌کند. هر چه دما کاهش می‌یابد، روند کاهش نیروی کاسیمیر دافعه کندتر شده و در فاصله‌های بزرگ‌تری به صفر میل می‌کند. در شکل (۷-ب) نیز منطبق بودن خطوط نیرو بر روی هم حکایت از آن دارد که در صورت اعمال اثر مگنتوالکتریک به اندازه کافی قوی، تغییرات دما هیچ تغییری بر روی اندازه نیروی کاسیمیر دافعه نمی‌تواند ایجاد کند. این همانند نتیجه‌ای است که برای نیروی کاسیمیر جاذبه در حضور اعمال مغناطش به اندازه کافی قوی بدست آمده بود. در حقیقت، باز هم مشاهده می‌شود که اگر اثر مگنتوالکتریک به اندازه کافی بزرگ باشد می‌تواند بر اثرات دمایی غلبه کرده، کنترل بزرگی و جهت نیرو را در اختیار گیرد.



۴.۳ نسبت بزرگی نیروی کاسیمیر دافعه به جاذبه $(\frac{F_R}{F_A})$

شکل (۸) نسبت بزرگی نیروی کاسیمیر دافعه به جاذبه $(\frac{F_R}{F_A})$ را با در نظر گرفتن طیف وسیعی از مغناطش اعمالی روی صفحات را نشان می‌دهد. در این شکل (۸)، نسبت بزرگی نیروی کاسیمیر دافعه به بزرگی نیروی کاسیمیر جاذبه در حضور تابع دی‌الکتریک دارای ویژگی $\frac{\omega_e}{\omega_R} = 0.8$ و با اعمال مغناطش‌های مختلف برای سه دمای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کلوین رسم شده است که نشان دهنده چگونگی واکنش‌های متفاوت نسبت به تغییرات دما است. مشاهده می‌شود که برای مغناطش‌های متناسب با \tilde{n} بزرگ‌تر از حدود ۵۹، اثرات دمایی به ازای هر سه دمای اعمال شده نتوانسته‌اند تغییری در نسبت بزرگی نیروها ایجاد کنند. از این رو، در این مطالعه از این محدوده به عنوان مغناطش قوی یاد شده است.



شکل ۸ تصویر نسبت بزرگی نیروی دافعه به جاذبه با اعمال طیف وسیعی از مغناطش‌های متفاوت روی دو صفحه. دماهای در نظر گرفته شده برای سامانه در شکل مشخص شده و فاصله بین صفحات ۲۰۰ نانومتر در نظر گرفته شده است.

بر اساس شکل (۸)، مشخص می‌شود که برای مغناطش‌های ضعیف، با افزایش دما قدرت نیروی کاسیمیر جاذبه افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش دما، کوچک‌ترین مغناطشی که در آن سامانه می‌تواند برهمکنش دافعه از خود نشان دهد (اعمال مغناطش پادموازی) نیز افزایش می‌یابد. افزون بر این، بیشینه نیروی دافعه با افزایش دما، نه تنها کاهش یافته بلکه به سمت مغناطش‌های قوی‌تر منتقل شده است. این درحالی است که با اعمال مغناطش‌های قوی اثر مگنتوالکتریک به قدری بزرگ

می شود که افت و خیزهای دمایی نمی توانند تغییری در بزرگی نیرو ایجاد کنند و هر سه نمودار بر یکدیگر منطبق می شوند.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، وابستگی نیروی کاسیمیر دافعه و جاذبه نسبت به افت و خیزهای دمایی میان دو صفحه از جنس عایق توپولوژیک در حضور مغناطش های ضعیف و قوی روی سطح دو صفحه با استفاده از نظریه لیفشیتز بررسی شده است. بررسی نتایج بدست آمده در مورد نیروی کاسیمیر جاذبه و دافعه نشان می دهد که در صورت ضعیف در نظر گرفتن محدوده مغناطش اعمالی، با افزایش فاصله بین دو صفحه، اثر افت و خیزهای دمایی قدرت بیشتری نسبت به اثر مغناطش و مگنتوالکتریک از خود نشان داده و منجر به افزایش قدرت نیروی کاسیمیر جاذبه می گردد. این در حالی است که در فواصل کوتاه، بزرگی و جهت مغناطش اثر قوی بر بزرگی و جهت نیرو می گذارد. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می شود که با در نظر گرفتن مغناطش های اعمالی قوی بر روی سطح صفحات، اثرات دمایی نمی توانند هیچگونه تغییری در نیروی کاسیمیر چه جاذبه و چه دافعه ایجاد کنند و عامل مشخص کننده بزرگی نیرو، اثر مگنتوالکتریک است. اعمال مغناطش پادموازی منجر به ایجاد اندرکنش دافعه می شود. اگرچه در بازه مغناطش های کوچک، اثرات دمایی بر روی برهمکنش های دافعه تاثیر قابل توجهی دارند. به صورتی که هرچه دما بالاتر در نظر گرفته می شود، اندرکنش دافعه به سرعت ضعیف شده و در فواصل بزرگ تر سهم نیروی دافعه به صفر میل می کند. مشاهده شد که اولین برهمکنش از جنس دافعه در سامانه با افزایش دما توسط اعمال مغناطش های پادموازی بزرگ تر رخ می دهد. این مطالعه منجر به افزایش دانش کنترل رشد نیروی کاسیمیر می شود و به پیروی از آن افق جدیدی را در طراحی سامانه های میکروالکترومکانیکی و نانوآلکترومکانیکی با بیشترین بازده و عملکرد پایدار ایجاد می کند. همان طور که اشاره شد مطالعه نیروی کاسیمیر در میکروسامانه ها باید با در نظر گرفتن شرایط محیطی حقیقی انجام شود. این شرایط محیطی می تواند در نظر گرفتن ویژگی های الکتریکی و مغناطیسی اجزا سامانه، تصحیحات دمایی، زبری سطوح و هندسه سامانه باشد که در این پژوهش، مطالعات با در نظر گرفتن ویژگی های اپتیکی عایق های توپولوژیک و اعمال تغییرات دمایی برای میکروسامانه شامل چنین موادی صورت پذیرفته است.



۵. تقدیر و تشکر

نویسندگان از حمایت‌های دانشکده فیزیک دانشگاه الزهراء تقدیر و تشکر می‌کنند.

منابع

- [1] Rodriguez A.W., Capasso F. and Johnson S.G., The Casimir effect in microstructured geometries, Nat. Photonics 5, 211-221, 2011. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2011.39>
- [2] Capasso F., Munday J.N., Iannuzzi D. and Chan H.B., Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal, 13, 400-414, 2007. <https://doi.org/10.1109/jstqe.2007.893082>
- [3] Ball P., "Fundamental physics: Feel the force", Nature, 447, 772-774, 2007. <https://doi.org/10.1038/447772a>
- [4] Goubault C., Jop P., Fermigier M., Baudry J., Bertrand E., and Bibette J., Flexible Magnetic Filaments as Micromechanical Sensors, Phys. Rev. Lett, 91, 26-31, 2003. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.260802>
- [5] Saga N. and Nakamura T., Elucidation of propulsive force of microrobot using magnetic fluid, J. Appl. Phys. 91, 7003-7005, 2002. <https://doi.org/10.1063/1.1452197>
- [6] Broer W., "The Casimir force and micro-electromechanical systems at submicronscale separations", PhD Thesis, University of Groningen, 2014.
- [7] Zhabinskaya D., "Casimir interactions between scatterers in carbon nanotubes. Publicly accessible Penn Dissertations", PhD Thesis, University of Pennsylvania, 2009.
- [8] Bordag M., et al, "Advances in the Casimir effect", PhD Thesis, Oxford university press, 145, 2009.
- [9] Casimir H.B G., Polder D., The Influence of Retardation on the London-van der Waals Forces, Phys. Rev. 73, 360, 1948 <https://doi.org/10.1103/PhysRev.73.360>
- [10] Dzyaloshinskii I. E., Lifshitz E. M., Pitaevskii L. P., General Theory of Van Der Waals' Forces, Sov. Phys. Usp. 4, 153, 1961. <https://doi.org/10.1070/PU1961v004n02ABEH003330>
- [11] Tajik F., "Casimir torques and lateral forces: influence of optical properties and surface morphology", PhD Thesis, University of Groningen, 2018
- [12] Hasan M.Z, Kane C.L., Colloquium: Topological Insulators, Rev. Mod. Phys. 82, 3045, 2010. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.3045>
- [13] Moore J.E., "The birth of topological insulators", Nature (London) 464, 194-198, 2010. <https://doi.org/10.1038/nature08916>
- [14] Grushin A.G., Cortejo A., Tunable Casimir Repulsion with Three-Dimensional Topological Insulators, Phys. Rev. Lett. 106, 2-14, 2011. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.020403>
- [15] Grushin A.G., Rodriguez-Lopez P., Cortejo A., "Nonlinear Actuation of Casimir Oscillators toward Chaos: Comparison of Topological Insulators and Metals" Phys. Rev. B 84, 045119, 2021. <https://doi.org/10.3390/universe7050123>
- [16] Babamahdi Z., Svetovoy V.B., Yimam D.T., Kooi B.J., Banerjee T., Moon J., Oh S., Enache M., Stöhr M., Palasantzas G., Casimir and electrostatic forces from Bi₂Se₃ thin films of varying thickness, Phys. Rev. B 103, 16, 2021. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.103.L161102>



- [17] Tajik F., Allameh N., Masoudi A.A, Palasantzas G., Nonlinear actuation of micromechanical Casimir oscillators with topological insulator materials toward chaotic, Chaos 32, 093149, 2022. <https://doi.org/10.1063/5.0100542>
- [18] Coronell V.De., Goncalves A.E., Baldiotti M.C., Batista R.C., "Repulsive Casimir force in stationary axisymmetric spacetimes", The European Physical Journal C, 82, 50, 2022. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-09994-4>
- [19] Bing S.L., "The Casimir effect in topological matter", Universe, 7,237,2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.11059>
- [20] Ezawa M., "Topological microelectromechanical systems", Phys. Rev. B 103, 155425, 2021. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.103.155425>
- [21] Zhang Q., Lee D., Zheng L., Ma X., and et al, "Gigahertz Topological Valley Hall Effect in Nanoelectromechanical Phononic Crystals", Nature Electronics, 5, 157, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41928-022-00732-y>
- [22] Dresselhaus M., Dresselhaus G., Cronin S., Souza Filho A., "Solid State Properties: From Bulk to Nano", 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55922-2>
- [23] Tajik F., Sedighi M., Babamahdi Z., Masoudi A. A., Waalkense H., Palasantzaz G., "Dependence of non-equilibrium Casimir forces on material optical properties towards chaotic motion during device actuation", Chaos 29, 093126, 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5124308>



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

