

Research Paper

Influence of Ferrofluid on the Casimir Force in a Three-layer Microsystem¹

Fatemeh Mahdi Maleki*², and Fatemeh Tajik³

Received: 2024.12.23

Revised: 2025.02.24

Accepted: 2025.04.12

1. Introduction

During the past decades the emergence of rapid development in micro/nano fabrication has led to scaling down of electromechanical systems into submicron length scales. This opens new areas for the application of the Casimir forces, since they could inevitably play role in the operation of micro/nano systems. These devices have sufficiently large surface areas and gaps small enough for the Casimir force even to pull components together leading to permanent adhesion, a phenomenon known as stiction. And this malfunction is in many cases unavoidable for the dynamical stability of micro/nano electromechanical systems (MEMS/NEMS) such as sensors, micro switches, actuators. Hence, a comprehensive knowledge about the magnitude and direction of the Casimir force can provide strong insight into the design and architecture of MEMS/NEMS. The Casimir force, which originates from perturbations of fluctuating electromagnetic (EM) fields, was discovered in 1948 by the Dutch physicist Hendrick Casimir. This is a quantum mechanical attractive force between two parallel, neutral, and perfectly conducting flat plates and without considering thermal fluctuations ($T=0$ K). In 1950's, Evgeny Lifshitz and co-workers proposed the general theory for the Casimir force between parallel flat plates made of real dielectric materials. For this purpose, it was utilized the fluctuation–dissipation theorem to relate the dissipative properties of the plates (optical absorption by many microscopic dipoles) and EM fluctuations.

2. Methodology

In this study, the Casimir force in a three-layer microsystem at room temperature between parallel plates made of gold, silicon carbide, and silica, free from any roughness, is examined using Lifshitz theory to consider the impact of the different optical properties. According to this theory, the effect

¹ <https://doi.org/10.22051/ijap.2025.49301.1440>

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

³ Assistant Professor, Department of Condensed Matter Physics, Faculty of Physics, Alzahra University, Tehran, Iran. Email: f.tajik@alzahra.ac.ir

of optical properties on the force magnitude is expressed through the dielectric function and magnetic permeability of the system components. Calculations were performed for distances ranging from 50 to 500 nanometers between the plates. The intermediate layer, consisting of a magnetic fluid formed from the carrier liquid and magnetic nanoparticles, was assumed. These nanoparticles possess the significant property of inherent magnetic permeability. The permittivity $\epsilon_{ff}(i\xi_n)$ of the ferrofluid can be obtained from the Rayleigh formula.

$$\epsilon_{ff}(i\xi_n) = \frac{\epsilon_m(i\xi_n)\epsilon_c(i\xi_n)(1 + \Phi) + 2\epsilon_c^2(i\xi_n)(1 - \Phi)}{\epsilon_m(i\xi_n)(1 - \Phi) + \epsilon_c(i\xi_n)(2 + \Phi)}$$

Where, $\epsilon_m(i\xi_n)$ is the dielectric permittivity of the magnetic nanoparticles, $\epsilon_c(i\xi_n)$ is the dielectric permittivity of the carrier liquid, and Φ is the volume fraction of magnetic nanoparticles. The magnetic permeability of ferrofluid is the other effective factor in the magnitude of the Casimir force via the Maxwell boundary conditions. At room temperature, the magnetic permeability decreases fast and reaches 1 before the first Matsubara frequency. As a result, the magnetic properties affect the Casimir force only through the zero-frequency term. Therefore, the magnetic permeability of the ferrofluid obtains the form.

$$\mu_{ff}(0) = 1 + \frac{2\pi^2\Phi}{9} \frac{M_s^2 D^3}{K_B T}$$

Where, M_s is the saturation magnetization per unit volume, which is considered to be 3×10^5 A/m for the magnetic nanoparticles under consideration. D is the diameter of the magnetic nanoparticles, and the temperature T is considered to be $T = 300$ K. To investigate the effect of the magnetic fluid on the magnitude of the Casimir force, the study first considered increasing the concentration of nanoparticles at a fixed diameter, followed by increasing the diameter of the nanoparticles at a fixed concentration. The Casimir force for the specified distance range with different plate materials was discussed and examined.

3. Results and Discussion

By changing the optical properties of the plates from a good conductor (gold) to a poor conductor (silica), the magnitude of the Casimir force decreases sharply, and this decrease is even greater if the gap between the plates is filled with a liquid layer (kerosene). By adding Fe_3O_4 ferromagnetic nanoparticles to kerosene in the middle layer, a magnetic fluid is formed. Fe_3O_4 ferromagnetic nanoparticles have inherent magnetic permeability. The presence of nanoparticles in the middle layer causes more waves to be generated, so the chance of high-intensity standing waves that can remain stationary in the middle increases, resulting in a decrease in the Casimir force. Permeability is proportional to concentration, so the difference between μ at large distances becomes more pronounced. It can be seen that increasing μ of the ferrofluid will lead to an increase in the Casimir force. As the diameter



increases, since the concentration is constant, the number of nanoparticles decreases and the intensity of the wave produced in the middle layer decreases, resulting in an increase in the pressure difference outside and between the plates and an increase in the force. This is weaker at short distances, but at long distances, with the increase in the effect of μ , this issue is clearly visible. Therefore, at a given distance between the plates, the amount of force becomes the same as when the crocin interlayer is considered. In fact, nanoparticles with a critical diameter could not cause a change in the magnitude of the Casimir force.

4. Conclusion

The results indicate that as the concentration of nanoparticles at a fixed diameter increases, the dielectric function of the magnetic fluid increases, affecting the reduction of the force. Additionally, at a fixed concentration, an increase in the diameter of the nanoparticles significantly impacts the increase of the Casimir force. Considering a larger diameter at a fixed concentration leads to a reduction in the number of nanoparticles, consequently increasing the force. An interesting effect observed in three-layer systems with a magnetic fluid intermediate layer is that at a fixed distance between the plates, adding magnetic nanoparticles of a specific diameter to the carrier fluid at a certain concentration has no effect on the Casimir force between the plates compared to when the intermediate layer is kerosene. Therefore, it can be said that the results of this study could significantly assist microsystems that require the generation of magnetic effects without altering their stable dynamic range and, consequently, the magnitude of the Casimir force. It also provides opportunities for precise control of the Casimir force in three-layer systems with a magnetic fluid intermediate layer, which could be utilized in the next generation of microdevices based on ferrofluids.

Keywords: *Casimir Force, Optical Properties, Lifshitz Theory, Ferrofluid, Magnetic Nanoparticle.*

References

- [1] Rodriguez, A.W., Capasso, F. and Johnson, S.G., "The Casimir effect in microstructured geometries", *Nature photonics* 5(4), 211-221, 2011. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2011.39>
- [2] Capasso, F., Munday, J.N., Iannuzzi, D. and Chan, H.B., "Casimir forces and quantum electrodynamical torques: Physics and nanomechanics", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 13(2), 400-414, 2007. <https://doi.org/10.1109/jstqe.2007.893082>
- [3] Huang, Kerson. *Fundamental Forces of Nature: The story of gauge fields*. World Scientific, 2007. https://doi.org/10.1142/9789812770714_0008

- [4] Saga, N. and Nakamura, T., "Elucidation of propulsive force of microrobot using magnetic fluid", *Journal of Applied Physics* 91(10), 7003-7005, 2002. <https://doi.org/10.1063/1.1452197>
- [5] Goubault, C., Jop, P., Fermigier, M., Baudry, J., Bertrand, E. and Bibette, J., "Flexible magnetic filaments as micromechanical sensors", *Physical review letters* 91(26), 260802, 2003. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.260802>
- [6] Broer, W., "The Casimir force and micro-electromechanical systems at submicron-scale separations", (2014). Electronic ISBNs: 978-90-367-7464-2
- [7] Tajik, F., "Casimir torques and lateral forces: influence of optical properties and surface morphology", (2018). Electronic ISBNs: 978-94-034-0818-7
- [8] Zhabinskaya, D., "Casimir interactions between scatterers in carbon nanotubes", PhD diss., University of Pennsylvania, 2009.
- [9] Bordag M., Klimchitskaya G. L., Mohideen U., and Mostepanenko V. M., *Advances in the Casimir effect*. PhD Thesis, Oxford university press, 2009.
- [10] Ekinici, K.L. and Roukes, M.L., "Nanoelectromechanical systems", *Review of scientific instruments* 76(6), 2005.: <https://doi.org/10.1063/1.1927327>
- [11] Casimir, H.B. and Polder, D., "The influence of retardation on the London-van der Waals forces", *Physical Review* 73(4), 360, 1948. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.73.360>
- [12] Dzyaloshinskii, I.E.E., Lifshitz, E.M., Pitaevskii, L.P. and Priestley, M.G., "The general theory of van der Waals forces", In *Perspectives in Theoretical Physics*, 443-492. Pergamon, 1992. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-036364-6.50039-9>
- [13] Geyer, B., Klimchitskaya, G.L. and Mostepanenko, V.M., "Thermal Casimir interaction between two magnetodielectric plates", *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics* 81(10), 104101, 2010. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.81.104101>
- [14] Hasan, M.Z. and Kane, C.L., "Colloquium: topological insulators", *Reviews of modern physics* 82(4), 3045-3067, 2010. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.3045>
- [15] Moore, J.E., "The birth of topological insulators", *Nature* 464(7286), 194-198, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature08916>
- [16] Tajik, F., Babamahdi, Z., Sedighi, M. and Palasantzas, G., "Nonlinear Actuation of Casimir Oscillators toward Chaos: Comparison of Topological Insulators and Metals", *Universe* 7(5), 123, 2021. <https://doi.org/10.3390/universe7050123>
- [17] Tajik, F., Allameh, N., Masoudi, A.A. and Palasantzas, G., "Nonlinear actuation of micromechanical Casimir oscillators with topological insulator materials toward chaotic motion: Sensitivity on magnetization and dielectric properties", *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* 32(9), 2022. <https://doi.org/10.1063/5.0100542>
- [18] Ashourvan, A., Miri, M. and Golestanian, R., "Rectification of the lateral Casimir force in a vibrating noncontact rack and pinion", *Physical Review*



- E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* 75(4), 040103, 2007. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.75.040103>
- [19] DelRio, F.W., De Boer, M.P., Knapp, J.A., David Reedy Jr, E., Clews, P.J. and Dunn, M.L., "The role of van der Waals forces in adhesion of micromachined surfaces", *Nature materials* 4(8), 629-634, 2005. <https://doi.org/10.1038/nmat1431>
- [20] Serry, F.M., Walliser, D. and Maclay, G.J., "The role of the Casimir effect in the static deflection and stiction of membrane strips in microelectromechanical systems (MEMS)", *Journal of Applied Physics* 84(5), 2501-2506, 1998. <https://doi.org/10.1063/1.368410>
- [21] Tajik, F., Sedighi, M. and Palasantzas, G., "Sensitivity of actuation dynamics on normal and lateral Casimir forces: Interaction of phase change and topological insulator materials", *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* 31(10), 2021. <https://doi.org/10.1063/5.0065033>
- [22] Munday, J.N., Capasso, F., Parsegian, V.A. and Bezrukov, S.M., "Measurements of the Casimir-Lifshitz force in fluids: The effect of electrostatic forces and Debye screening", *Physical Review A—Atomic, Molecular, and Optical Physics* 78(3), 032109, 2008. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.78.032109>
- [23] Klimchitskaya, G.L., Mostepanenko, V.M., Nepomnyashchaya, E.K. and Velichko, E.N., "Impact of magnetic nanoparticles on the Casimir pressure in three-layer systems", *Physical Review B* 99(4), 045433, 2019. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.045433>
- [24] Velichko, E.N., Klimchitskaya, G.L. and Mostepanenko, V.M., "Dispersion forces between metal and dielectric plates separated by a magnetic fluid", *Technical Physics* 64, 1260-1266, 2019. <https://doi.org/10.1134/S1063784219090214>
- [25] Velichko, E.N., Klimchitskaya, G.L. and Nepomnyashchaya, E.N., "Casimir effect in optoelectronic devices using ferrofluids", *Journal of Electronic Science and Technology* 18(1), 100024, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jnlest.2020.100024>
- [26] Obrecht, J.M., Wild, R.J., Antezza, M., Pitaevskii, L.P., Stringari, S. and Cornell, E.A., "Measurement of the temperature dependence of the Casimir-Polder force", *Physical review letters* 98(6), 063201, 2007. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.063201>
- [27] Nasiri, Z., Aali, M. and Tajik, F., "Influence of Thermal Fluctuation on Attractive and Repulsive Casimir Forces in Microsystem with Topological Insulator Material", *Iranian Journal of Applied Physics* 14(2), 128-144, 2024. <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.45814.1374>
- [28] Dadi, Z., Masoudi, A.A., Tajik, F. and Palasantzas, G., "Influence of optical property contrast on the critical distribution of electrostatic torques in double-beam torsional Casimir actuators: Non-linear actuation toward chaotic motion", *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* 33(11), 2023. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0168044>
- [29] Tajik, F. and Palasantzas, G., "Dynamical Sensitivity of Three-Layer MEMS to the Optical Properties of the Intervening Liquid Layer", (2023). <https://doi.org/10.20944/preprints202309.1995.v1>

- [30] Sedighi, M., Svetovoy, V.B., Broer, W.H. and Palasantzas, G., "Casimir forces from conductive silicon carbide surfaces", *Physical Review B* 89(19), 195440, 2014. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.89.195440>
- [31] Hong, C.Y., Jang, I.J., Horng, H.E., Hsu, C.J., Yao, Y.D. and Yang, H.C., "Ordered structures in Fe₃O₄ kerosene-based ferrofluids", *Journal of applied physics* 81(8), 4275-4277, 1997. <https://doi.org/10.1063/1.364800>
- [32] Mirzaei, M., Masoudi, A.A., Tajik, F. and Palasantzas, G., "Dynamical sensitivity of a three-layer microsystem under the influence of the Casimir force in a ferrofluid", *Chaos, Solitons & Fractals* 189, 115637, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2024.115637>



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/>).



بررسی تأثیرات سیال مغناطیسی بر روی بزرگی نیروی کاسیمیر در یک میکروسامانه سه لایه^۱

فاطمه مهدی ملکی^{۲*} و فاطمه تاجیک^۳

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال پانزدهم، پیاپی ۴۱، تابستان ۱۴۰۴

صص ۱۳۷ - ۱۵۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳

چکیده:

در این مطالعه حساسیت نیروی کاسیمیر در یک میکروسامانه سه لایه با در نظر گرفتن سیال مغناطیسی به عنوان لایه میانی و صفحات دارای ویژگی‌های اپتیکی متفاوت با استفاده از نظریه لیفتشیتز بررسی شده است. جنس صفحات از طلا (Au)، سیلیکا (SiO_2) و سیلیکون کرباید (SiC) به منظور پوشش طیف گسترده‌ای از رسانندگی، در نظر گرفته شده است. دیده شده است که با تغییر صفحات از رسانای خوب به رسانای ضعیف بزرگی نیروی کاسیمیر به شدت کاهش می‌یابد و اگر فاصله بین صفحات از یک لایه مایع پر شود، این روند کاهش بیشتر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد حضور سیال مغناطیسی که با افزودن نانوذرات مغناطیسی اکسید فریک (Fe_3O_4) به کروسین ($C_{12}H_{26}-C_{15}H_{32}$) تشکیل می‌شود، منجر به کاهش نیروی کاسیمیر می‌شود. همچنین با افزایش غلظت نانوذرات (در قطر ثابت) نیروی کاسیمیر دچار کاهش شدید شده و البته با افزایش قطر نانوذرات (در غلظت ثابت) نیروی کاسیمیر قدرت می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد تأثیر ویژگی اپتیکی صفحات بر این رفتار تأثیرگذار است. همچنین مشاهده شده است در یک فاصله ثابت بین صفحات، افزودن نانوذرات مغناطیسی با قطر مشخص تأثیری بر بزرگی نیروی کاسیمیر نسبت به حالتی که لایه میانی سیال غیرمغناطیسی است، ندارد و در نظر گرفتن این نکته در طراحی سامانه‌های میکروالکترومکانیکی ($MEMS$) که تحت اثرات مغناطیسی فعالیت می‌کنند، بسیار بااهمیت است.

واژگان کلیدی: نیروی کاسیمیر، ویژگی‌های اپتیکی، نظریه لیفتشیتز، سیال مغناطیسی، نانوذرات مغناطیسی.

^۱ <https://doi.org/10.22051/ijap.2025.49301.1440>

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

^۳ استادیار، گروه ماده چگال، دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران. Email: f.tajik@alzahra.ac.ir



۱. مقدمه

امروزه پیدایش و توسعه سریع نانوفناوری منجر به کوچک‌سازی سامانه‌های الکترومکانیکی به مقیاس‌های میکرو (MEMS^۱) و نانو (NEMS^۲) شده است [۱-۳]. در این راستا به عنوان مثال می‌توان از میکرو سوئیچ‌ها، میکروروباتیک‌ها [۴] و میکرو حسگرها [۵،۶] نام برد. این سامانه‌ها زمینه‌های جدیدی را برای کاربرد نیروی کاسیمیر به عنوان یک نیروی غیرقابل اجتناب و همیشه حاضر در این سامانه‌ها فراهم می‌آورد. نیروی کاسیمیر ناشی از افت‌وخیزهای کوانتومی امواج الکترومغناطیس در نقطه صفر انرژی در خلاء است و این افت‌وخیزها هیچگاه صفر نمی‌شوند. اگر میکروسامانه‌ای با کمک نیروی الکتریکی و نیروی کاسیمیر کنترل شود، روشن است که با قطع ولتاژ نیروی الکتریکی صفر می‌شود ولی نیروی کاسیمیر بنا به ماهیتش هرگز محو نمی‌شود. در میکروسامانه نسبت سطح به حجم اجزا بسیار زیاد می‌باشد [۷] و این امر سبب می‌شود که اثرات سطحی و شرایط مرزی در این سامانه‌ها دارای اهمیت باشد که منجر به قدرت گرفتن نیروی کاسیمیر در بازدهی این نوع ادوات می‌شود. بنابراین، نیروی کاسیمیر در بازدهی میکروسامانه‌های الکترومکانیکی و همچنین در ابعاد نانو، نانوسامانه‌های الکترومکانیکی نقش بسزایی را نشان می‌دهد [۸-۱۰]. از جمله مهم‌ترین دلایل مطالعه نیروی کاسیمیر نقش آن بر روی دینامیک نانو و میکروسامانه‌های الکترومکانیکی در شرایط محیطی متفاوت است [۱، ۲].

نیروی کاسیمیر در سال ۱۹۴۸ با ایجاد شرایط مرزی در خلا توسط کاسیمیر^۳ بیان شد. به این گونه که اگر دو صفحه وسیع موازی دارای رسانایی کامل، بدون هرگونه زبری و بار خالص، در خلا و در دمای صفر کلون قرار بگیرند، بین آن‌ها نیرویی از جنس جاذبه به وجود می‌آید که این نیروی کوانتومی تاخیری به نام نیروی کاسیمیر شد [۱۱]. این نیروی جاذبه به صورت $F_{cas} = \frac{\pi^2 \hbar c}{240z^4}$ بیان شد که در آن C سرعت نور، $\hbar$ ثابت پلانک، d فاصله بین صفحات و A مساحت هر صفحه می‌باشد. حدود یک دهه بعد لیفشیتز و همکارانش پیرو محاسبات کاسیمیر، با استفاده از نظریه اتلاف-افت‌وخیز [۱۲] به محاسبه نیروی کاسیمیر بین مواد حقیقی و با در نظر گرفتن اثرات برانگیختگی‌های دمایی [۷] پرداختند. بر اساس این نظریه، موج الکترومغناطیس جذب شده در ماده منبعی برای تولید افت‌وخیز ذرات باردار و ایجاد جریان است. در این نظریه همچنین ویژگی‌های اتلافی صفحات از راه جذب اپتیکی با استفاده از بسیاری از دوقطبی‌های میکروسکوپی، به نوسانات امواج

^۱ Micro Electro Mechanical System

^۲ Nano Electro Mechanical System

^۳ H. Casimir



الکترومغناطیسی درون صفحات وابسته است. این نظریه هر دو روش برهمکنشی کوتاه‌برد (واندروالس) و بلندبرد (کاسیمیر) را پوشش می‌دهد.

بر اساس پژوهش‌های لیفشیتز، ویژگی‌های اپتیکی اجزای سازنده‌ی یک میکروسامانه تأثیر بسزایی در میزان نیروی کاسیمیر دارند. اگر اجزا میکروسامانه رسانایی پایینی داشته باشند، نیروی کاسیمیر با تغییر فاصله افزایش چشمگیری نخواهد یافت [۷]. ویژگی‌های اپتیکی در حقیقت واکنشی است که هر ماده از راه گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی نسبت به محیط اطرافش از خود نشان می‌دهد [۱۳]، بنابراین به جنس صفحات بستگی دارد. افزون بر این، می‌توان با انتخاب مواد مناسب، ماهیت نیروی کاسیمیر را از جاذبه به دافعه تغییر داد و با تنظیم شرایط محیطی مطلوب، میزان آن را به صورت دلخواه کنترل کرد [۱۷-۱۴]. مطالعات نشان دادند که در فضای خلاء بین دو صفحه نیروی کاسیمیر همواره از جنس جاذبه می‌باشد که ممکن است تحت شرایطی افزایش بسیار زیاد این نیرو سبب کشیده شدن صفحات به سمت هم شود و منجر به ایجاد چسبندگی بین اجزا در میکروسامانه شود که در نهایت منجر به عملکرد نکردن سامانه می‌شود [۲۱-۱۸]. بنابراین، دانش دقیق شرایطی که توانایی تنظیم جهت و بزرگی نیروی کاسیمیر باشد در طراحی و ساخت میکروسامانه‌ها بسیار مهم است [۲۱]. تاکنون مطالعات گسترده‌ای در مورد نیروی کاسیمیر بین دو صفحه غیرمغناطیسی و مغناطیسی که لایه‌میانی آن‌ها خلاء است، انجام شده است. با این حال، اگر لایه‌میانی با مایعی پر شود که گذردهی الکتریکی صفحات و مایع برخی شرایط را برآورده کنند، نیروی کاسیمیر دافعه بین اجزا به وجود می‌آید [۱۲]. بنابراین مطالعه سامانه‌های سه لایه به منظور دستیابی به نیروی کاسیمیر دافعه و افزایش بازدهی میکروسامانه همواره مورد توجه پژوهشگران این حوزه بوده است. تاکنون نیروی کاسیمیر جاذبه و دافعه در میکروسامانه سه لایه شامل لایه‌میانی مایع نیز اندازه‌گیری شده است [۸، ۲۲].

محاسبه نیروی کاسیمیر بین دو صفحه با لایه‌میانی سیال مغناطیسی در مطالعات پیشین صورت گرفته است و نشان داده شده است که استفاده از سیال مغناطیسی^۱ (یا فروسیال) به عنوان لایه‌میانی در میکروسامانه‌های سه لایه منجر به پیدایش و گسترش کاربردهای میکرو و نانو سامانه‌ها در حسگرهای میکرومکانیکی، میکروروباتیک و غیره می‌شود [۲۳، ۲۴]. سیال مغناطیسی، از مایع حامل و نانوذرات مغناطیسی پوشیده شده با سورفکتانت^۲ برای جلوگیری از تجمع آن‌ها، تشکیل شده است [۲۵]. به دنبال تغییر شرایط مرزی در معادلات ماکسول بزرگی نیروی کاسیمیر نیز متأثر از حضور

¹ Ferrofluid

² Surfactant

نانوذرات مغناطیسی در مایع حامل خواهد شد [۲۶]. 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 [۲۷]. در این مطالعه بررسی شده است که ویژگی‌های اپتیکی اجزای میکروسامانه سه‌لایه چگونه می‌توانند در فواصل متفاوت، بر بزرگی نیروی کاسیمیر تولید شده در سامانه تاثیر گذار باشد. همچنین مطالعه شده است که آیا انتخاب سیال مغناطیسی به عنوان لایه‌میانی در یک میکروسامانه سه‌لایه شامل صفحات با ویژگی‌های اپتیکی متفاوت می‌تواند قدرت نیروی کاسیمیر را تغییر دهد و این رفتار آیا در فواصل مختلف متفاوت است و یا این رفتار به ویژگی اپتیکی اجزا سازنده نیز وابسته است. افزون بر این، نشان داده شده است که آیا تغییر در غلظت و قطر نانوذرات مغناطیسی با توجه به موثر بودن در پاسخ الکتریکی و مغناطیسی فروسیال و به دنبال آن تغییر در شرایط مرزی معادلات ماکسول می‌تواند بزرگی نیروی کاسیمیر را تغییر دهد. آیا می‌توان فاصله معینی میان صفحات را پیدا کرد که افزودن نانوذرات با یک غلظت و قطر ثابت تاثیری بر بزرگی نیروی کاسیمیر در میکروسامانه سه‌لایه نداشته باشد. در حقیقت، آیا می‌توان یک قطر بحرانی را پیدا کرد که در آن تغییرات نیروی کاسیمیر صفر باشد. در این پژوهش برای اولین بار به این سوال پاسخ داده شده است که قطر بحرانی افزون بر حساسیت به قطر و غلظت نانوذرات چگونه با سطح رسانندگی میکروسامانه نیز تغییر می‌کند. این دانش می‌تواند برای طراحی میکروسامانه‌های فعال در محیط مغناطیسی بسیار مهم و کاربردی باشد.

۲. روش کار

سامانه مورد مطالعه در این پژوهش شامل دو صفحه موازی بدون هرگونه زبری است که در فواصل ۵۰ تا ۵۰۰ نانومتری از یکدیگر قرار گرفته‌اند (در این فواصل در نظر گرفته شده می‌توان از زبری سطوح صرف نظر کرد). دمای محیط نیز 300 K (دمای اتاق) فرض شده است. به منظور مطالعه اثر ویژگی‌های اپتیکی متفاوت جنس صفحات از طلا، سیلیکا و سیلیکون کرباید در نظر گرفته شده است. افزون بر این، فرض شده است سیال مغناطیسی مبتنی بر مایع حامل کروسین^۱ و شامل نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 به عنوان لایه‌میانی بین صفحات در این میکروسامانه می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از نظریه لیفشیتز نیروی کاسیمیر در میکروسامانه شرح داده شده، محاسبه شده است. این محاسبات با کدنویسی با استفاده از برنامه متلب صورت گرفته است. در محاسبه نیروی کاسیمیر از راه نظریه لیفشیتز بخش موهومی تابع دی‌الکتریک از اهمیت بالایی برخوردار است [۱۲، ۲۷].

¹ Kerosene



شکل (۱) بخش موهومی تابع دی‌الکتریک را بر حسب بسامد موهومی برای ماده طلا نشان می‌دهد [۲۴]. همانطور که مشاهده می‌شود قسمت موهومی تابع دی‌الکتریک طلا به دلیل جذب بالای الکترون‌های رسانش، بسیار بزرگ می‌باشد و منجر به نیروی کاسیمیر قوی در میکروسامانه ساخته شده از این ماده می‌شود. به همین دلیل، طلا به صورت گسترده برای اندازه‌گیری نیروی کاسیمیر استفاده می‌شود [۲۸، ۲۹]. با این وجود، فلزات همیشه گزینه‌های خوبی برای ساخت میکروسامانه‌ها نیستند و در عوض سیلیکا و سیلیکون کرباید گزینه‌های خوبی برای دستیابی به میکروادوات دارای دوام و استحکام بالا و حساسیت قوی به نوسانات حرارتی هستند. امروزه، سیلیکون کرباید به دلیل ویژگی‌های حرارتی، الکتریکی و مکانیکی منحصر به فرد خود، حوزه کاربرد سامانه‌ها را گسترش داده است [۲۸-۳۰]. همچنین کروسین اغلب به عنوان یک مایع حامل در سیال‌های مغناطیسی استفاده می‌شود و در پژوهش‌های مرتبط با نیروهای کاسیمیر مورد توجه قرار گرفته است [۲۳، ۲۴، ۳۱].

شکل (۲) نیز نشان‌دهنده بخش موهومی تابع دی‌الکتریک مواد سیلیکون کرباید، سیلیکا و کروسین می‌باشد [۲۳، ۲۴]. با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده برای قسمت موهومی تابع دی‌الکتریک کروسین در محدوده مایکروویو و مادون قرمز رابطه زیر برای تابع دی‌الکتریک این ماده بر حسب بسامد موهومی ماتسوبارا بدست می‌آید [۲۳، ۲۴].

$$\varepsilon_c(i\xi_n) = 1 + \frac{B}{1 + \xi_n \tau} + \frac{C_{IR}}{1 + (\frac{\xi_n}{\omega_{IR}})^2} + \frac{C_{UV}}{(\frac{\xi_n}{\omega_{UV}})^2} \quad (1)$$

درحالی‌که، ξ_n بسامد موهومی ماتسوبارا ($\xi_n = 2\pi K_B T n / \hbar$, $n \in \mathbb{Z}$) است و $\hbar$ ثابت پلانک و K_B ثابت بولتزمن است. جمله دوم در سمت راست معادله (۱) سهم گذردهی دی‌الکتریک ناشی از جهت‌گیری دوقطبی‌های دائمی در مایعات قطبی را بیان می‌کند. ثابت‌های $B=0.020$ و $1/\tau = 8.0 \times 10^8 \text{ rad/s}$ از داده‌های اندازه‌گیری شده در ناحیه مایکروویو مشخص شده‌اند. جمله سوم، اثر قطبش یونی را با $C_{IR} = 0.007$ و $\omega_{IR} = 2.14 \times 10^{14} \text{ rad/s}$ نشان می‌دهد که از داده‌های نوری در ناحیه مادون قرمز بدست آمده است. به صورت مشابه، جمله چهارم به دلیل داده‌های نوری اما در محدوده فرابنفش است که دارای کمیت‌های $C_{UV} = 0.773$ و $\omega_{UV} = 1.0 \times 10^{16} \text{ rad/s}$ می‌باشد [۹، ۲۳، ۲۴ و ۳۲].

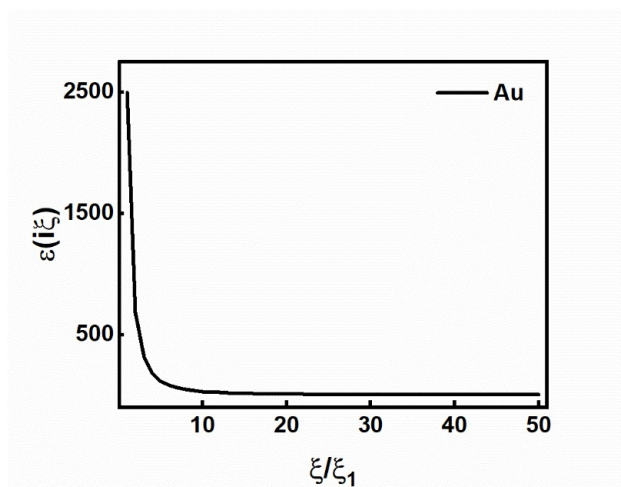


Fig. 1 The imaginary part of the dielectric function for Au vs. ration ξ/ξ_1 (where ξ_1 is the first Matsubara frequency).

شکل ۱ قسمت ۱ موهومی تابع دی الکتریک بر حسب بسامد موهومی نرمال شده به بسامد اول ماتسوبارا برای طلا.

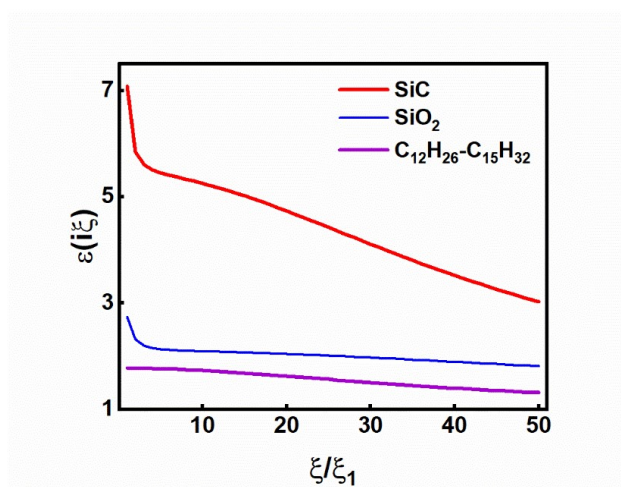


Fig. 2 The imaginary part of the dielectric function ration ξ/ξ_1 (where ξ_1 is the first Matsubara frequency). The materials are indicated.

شکل ۲ قسمت ۲ موهومی تابع دی الکتریک بر حسب بسامد موهومی نرمال شده به بسامد اول ماتسوبارا برای سیلیکون کرباید، سیلیکا و کرو سین.



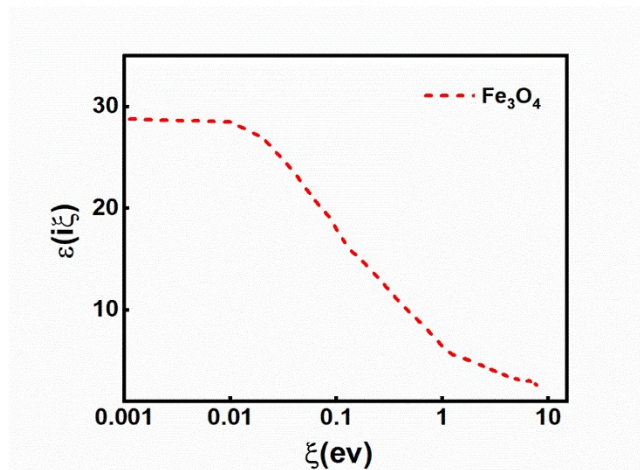


Fig. 3 The imaginary part of the dielectric function for Fe_3O_4 vs Matsubara frequency.

شکل ۳ قسمت موهومی تابع دی الکتریک بر حسب بسامد موهومی برای نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 .

براساس مقالات گزارش شده پیشین بخش موهومی تابع دی الکتریک بر حسب بسامد موهومی برای سیال مغناطیسی را می توان از فرمول ریلی^۱ به صورت زیر بدست آورد [۲۳، ۲۴، ۳۲].

$$\varepsilon_{ff}(i\xi_n) = \frac{\varepsilon_m(i\xi_n)\varepsilon_c(i\xi_n)(1+\Phi) + 2\varepsilon_c^2(i\xi_n)(1-\Phi)}{\varepsilon_m(i\xi_n)(1-\Phi) + \varepsilon_c(i\xi_n)(2+\Phi)} \quad (2)$$

در این رابطه، Φ غلظت نانوذرات مغناطیسی در سیال، $\varepsilon_m(i\xi_n)$ تابع دی الکتریک نانوذرات (شکل (۳)) و $\varepsilon_c(i\xi_n)$ تابع دی الکتریک مایع حامل (کرو سین) می باشد. باید توجه داشت که معادله (۲) تحت شرط $\lambda \ll D$ بدست آمده است که λ طول موج مشخصه^۲ سامانه و D قطر نانوذرات می باشد.

همانطور که در بخش اول بیان شد، نانوذرات مغناطیسی ممکن است با برخی سورفکتانت ها پوشیده شوند تا از تجمع آن ها جلوگیری شود و فرض شده است که تابع دی الکتریک سورفکتانت به تابع دی الکتریک مایع حامل نزدیک است، از این رو، سیال مغناطیسی را می توان به عنوان مخلوطی از دو ماده در نظر گرفت [۲۳-۲۵]. حضور نفوذپذیری مغناطیسی فروسیال عامل مؤثر دیگری در بزرگی نیروی کاسیمیر است، چرا که شرایط پیوستگی روی مرز در معادلات ماکسول با تغییراتی

¹ Rayleigh

² Characteristic Wavelength

مواجه می شود. باید تأکید کرد که ویژگی های مغناطیسی تنها از راه جمله بسامد صفر فرمول لیفتشیتز بر نیروی کاسیمیر تأثیر می گذارد. دلیل آن است که در دمای اتاق نفوذپذیری مغناطیسی این ماده به سرعت کاهش می یابد، به صورتی که قبل از اولین بسامد ماتسوبارا نفوذپذیری نسبی به یک می رسد. بنابراین نفوذپذیری مغناطیسی فروسیال به صورت زیر نوشته می شود [۲۳، ۳۲]:

$$\mu_{ff}(0) = 1 + \frac{2\pi^2\Phi}{9} \frac{M_s^2 D^3}{K_B T} \quad (3)$$

که در آن، K_B ثابت بولتزمن، D قطر نانوذرات و M_s مغناطش اشباع^۱ در واحد حجم است که برای نانوذرات مغناطیسی مورد بررسی $M_s \approx 3 \times 10^5 \text{ A/m}$ در نظر گرفته شده است [۲۳، ۲۴]. نیروی کاسیمیر بین دو صفحه موازی در تعادل حرارتی با محیط اطراف بر اساس نظریه لیفتشیتز برحسب بسامد موهومی با معادله زیر داده می شود:

$$F_{cas}(z) = -\frac{K_B T}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^{\infty} K_{\perp} dK_{\perp} K_{ff}(i\xi_n, K_{\perp}) \times \sum_{\alpha=s,p} \left[\frac{e^{2zK_{ff}(i\xi_n, K_{\perp})}}{r_{\alpha}^2(i\xi_n, K_{\perp})} - 1 \right]^{-1} \quad (4)$$

در معادله (۴) علامت پریم بر روی نماد جمع نیز به این معناست که جمله مرتبط با $n = 0$ دارای ضریب $\frac{1}{2}$ است. بزرگی بردار موج درون صفحات برابر $K_{\perp}$ ، بردار موج خارج از صفحات برابر $K(i\xi_n, K_{\perp}) = [K_{\perp}^2 + \varepsilon(i\xi_n) \frac{\xi_n^2}{c^2}]^{1/2}$ و بردار موج در سیال مغناطیسی برابر $K_{ff}(i\xi_n, K_{\perp}) = [K_{\perp}^2 + \varepsilon_{ff}(i\xi_n) \mu_{ff}(i\xi_n) \frac{\xi_n^2}{c^2}]^{1/2}$ است [۲۳، ۲۴]. p و s دو قطبش جداگانه میدان الکترومغناطیسی، یعنی به ترتیب قطبش الکتریکی عرضی (TE^2) و قطبش مغناطیسی عرضی (TM^3) را بیان می کنند [۲۳، ۲۴، ۳۲]. ضرایب بازتاب فرنل به صورت معادلات (۵) و (۶) داده می شوند.

$$r_{TE}(i\xi_n, K_{\perp}) = \frac{K_{ff}(i\xi_n, K_{\perp}) - \mu_{ff}(i\xi_n) K(i\xi_n, K_{\perp})}{K_{ff}(i\xi_n, K_{\perp}) + \mu_{ff}(i\xi_n) K(i\xi_n, K_{\perp})} \quad (5)$$

$$r_{TM}(i\xi_n, K_{\perp}) = \frac{\varepsilon(i\xi_n) K_{ff}(i\xi_n, K_{\perp}) - \varepsilon_{ff}(i\xi_n) K(i\xi_n, K_{\perp})}{\varepsilon(i\xi_n) K_{ff}(i\xi_n, K_{\perp}) + \varepsilon_{ff}(i\xi_n) K(i\xi_n, K_{\perp})} \quad (6)$$

¹ Saturation magnetization

² Transverse Electric polarization

³ Transverse Magnetic polarization



۳. نتایج و بحث

برای نشان دادن تغییرات نیروی کاسیمیر ناشی از ویژگی‌های اپتیکی متفاوت تشکیل دهنده اجزای سامانه از عامل کاهش^۱ استفاده می‌شود. در حقیقت عامل کاهش میزان انحراف نیروی کاسیمیری که از نظریه لیفشیتز محاسبه می‌شود، را نسبت به نیروی کاسیمیر ایده آل یعنی نیروی بین دو صفحه رسانای ایده آل و موازی و در دمای صفر مطلق، نشان می‌دهد [۱۲]. عامل کاهش به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\eta(z) = \frac{F_{cas}^L(z)}{F_{cas}(z)} \quad (7)$$

بزرگی عامل کاهش بین صفر تا یک ($0 < \eta < 1$) می‌باشد. هر چه η از یک فاصله بگیرد بیانگر این است که نیرو از نیروی ایده آل دورتر شده است و هر چه عامل کاهش به یک نزدیک شود به این مفهوم است نیرو به حالت ایده آل نزدیک تر می‌شود و به این معنا است که جذب ناشی از ویژگی‌های اپتیکی مواد قوی تر شده است.

۱.۳. اثر ویژگی‌های اپتیکی مختلف بر نیروی کاسیمیر

با توجه به شکل (۴) قسمت (الف) در تمام فاصله‌ها عامل کاهش در طلا نسبت به سیلیکا قوی تر می‌باشد و این به همان دلیل جذب بالاتری است که به دلیل وجود الکترون‌های آزاد در طلا رخ می‌دهد. با توجه به این مطلب در مورد صفحات طلا می‌توان گفت وقتی موج الکترومغناطیس به صفحات طلا می‌خورد با توجه به جذب قوی در این ماده اختلاف فشار بیرون و بین صفحات ناشی از امواج الکترومغناطیس بسیار زیاد می‌شود، از این رو نیروی کاسیمیر رشد می‌کند [۲۴]. افزون بر این بزرگی نرخ تغییرات η نیز به ویژگی‌های اپتیکی مواد تشکیل دهنده اجزای یک سامانه وابسته است. مطابق شکل دیده می‌شود که میزان تغییرات نرخ رشد η در طلا در مقایسه با سیلیکا هنگام حرکت به سمت فاصله‌های بزرگ بسیار مشهود می‌باشد، چرا که با افزایش فاصله بسامد موهومی مشخصه سامانه ($\xi_{ch} = \frac{c}{2z}$) کوچک می‌شود و در بسامدهای کوچک تابع دی‌الکتریک طلا به شدت قوی می‌شود، این در حالی است که برای سیلیکا تابع دی‌الکتریک در بسامدهای مختلف تغییرات شدیدی ندارد [۲۹]. با افزایش اختلاف بین عامل کاهش در طلا و سیلیکا تاثیر قدرت

^۱ Reduction factor

ویژگی‌های اپتیکی بسیار چشمگیر می‌شود. این نتایج که با استفاده از نظریه لیفتشیتز بدست آمد می‌تواند در صنعت برای هدایت نیروی کاسیمیر بسیار موثر باشد.

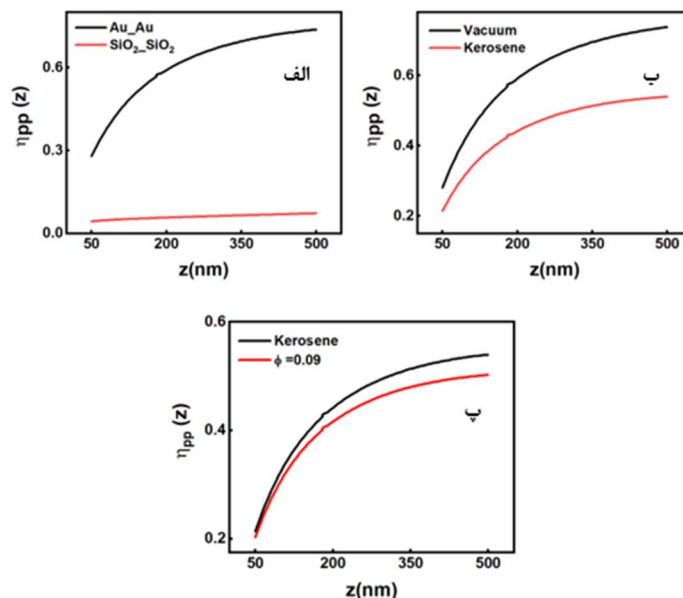


Fig. 4 Reduction factor vs distance at room temperature is shown (a) vacuum is considered as intermediate layer of MEMS, (b) the intermediate layer of Au-based MEMS is indicated, and (c) the intermediate layer of Au-based MEMS is kerosene of ferro fluid at concentration of 0.09.

شکل ۴ بزرگی عامل کاهش نسبت به فاصله در دمای اتاق (۳۰۰ کلوین) بین (الف) دو صفحه طلا و سیلیکا با لایه میانی خلاء، (ب) دو صفحه طلا با لایه میانی خلاء و کروسین و (پ) دو صفحه طلا با لایه میانی کروسین و سیال مغناطیسی با نانوذرات به غلظت ۰/۰۹.

همان‌طور که شکل (۴-ب) نشان می‌دهد η در سامانه‌ای که لایه میانی آن خلاء است، نسبت به سامانه‌ای که لایه میانی آن از کروسین (سیال غیرمغناطیسی) پر شده، قوی‌تر است به این معنا که در سامانه‌ای که لایه میانی خلاء می‌باشد نیرو قوی‌تر است نسبت به سامانه‌ای که لایه میانی کروسین می‌باشد [۲۳]. این مشاهده را می‌توان با بررسی ماهیت امواج الکترومغناطیسی و برهمکنش آن‌ها با مواد مختلف توجیه کرد. بخشی از موج الکترومغناطیس از صفحات عبور می‌کند، خود را به فضای میانی می‌رساند، وقتی لایه میانی کروسین باشد موج عبوری به ساختار کروسین برخورد کرده و اتم‌ها می‌توانند به دوقطبی تبدیل شوند، برخورد موج به دوقطبی‌ها سبب نوسان و تابش آن‌ها می‌شود و می‌توانند موجی هم بسامد با آن نوسان تولید کنند. از این‌رو، وقتی لایه میانی کروسین می‌باشد،



شانس ایجاد امواج ایستا با شدت بالا که متناسب هستند، برای بقای طولانی در وسط دو صفحه بیشتر می شود. به عبارتی، حضور ماده در لایه میانی سبب ایجاد افت اختلاف فشار در سامانه شده و در نتیجه، نیروی کاسیمیر کاهش می یابد.

۲.۳. اثر سیال مغناطیسی بر نیروی کاسیمیر

با افزودن نانوذرات فرومغناطیس Fe_3O_4 به کروسین در لایه میانی، سیال مغناطیسی تشکیل می شود. نانوذرات فرومغناطیس Fe_3O_4 دارای نفوذپذیری مغناطیسی ذاتی $(\mu(i\xi))$ هستند [۲۳] و در برهمکنش با امواج الکترومغناطیس عبوری از صفحات موج الکترومغناطیس تولید می کنند، چرا که سطح انرژی نانوذرات در حضور میدان مغناطیسی تغییر می کند. روشن است که کمترین انرژی و پایدارترین حالت زمانی اتفاق می افتد که μ با B هم راستا شود. از سوی دیگر می دانیم در یک موج الکترومغناطیس همواره جهت میدان مغناطیسی تغییر می کند، در نتیجه μ دائم در حال نوسان است که سبب ایجاد تابش موج می شود. پس حضور نانوذرات در لایه میانی سبب می شود امواج بیشتری تولید شود. از این رو، شانس امواج ایستا با شدت بالا که می توانند در وسط مانا باقی بمانند بیشتر می شود، در نتیجه اختلاف فشار بیرون و درون صفحات کمتر شده و نیروی کاسیمیر نیز کم می شود. این کاهش در شکل (۴-پ) مشاهده می شود.

• بررسی غلظت های متفاوت نانوذرات در لایه میانی بر نیروی کاسیمیر

نیروی کاسیمیر در میکروسامانه ای را بررسی کردیم که به کروسین در لایه وسط نانوذرات فرومغناطیس Fe_3O_4 در غلظت های متفاوت و قطر ثابت اضافه شده است. در شکل (۵) مشاهده می شود با افزایش غلظت (Φ) نانوذرات تزریق شده به لایه میانی، قسمت موهومی تابع دی الکتریک قوی تر می شود. در نتیجه انتظار کاهش نیروی کاسیمیر و در پی آن کاهش η را داریم.

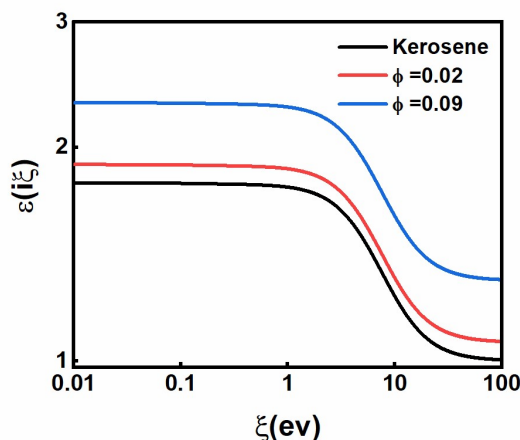


Fig. 5 The imaginary part of the dielectric function of ferrofluid at various concentration vs the imaginary frequency.

شکل ۵ قسمت موهومی تابع دی الکتریک بر حسب فرکانس موهومی.

در شکل (۶) مشاهده می شود که تاثیر تغییر غلظت با افزایش فاصله بسیار شدید می شود. برای توجیه آن باید گفت که در فاصله های زیاد حجمی که در لایه میانی قرار می گیرد، افزایش می یابد و قرار بر این است که درصد مشخص و ثابتی از این حجم را نانوذرات پر کنند. از این رو، با افزایش فاصله تعداد نانوذرات نیز زیاد می شود. این موضوع در غلظت های ۰/۰۲ و ۰/۰۹ کاملاً قابل مشاهده است؛ حتماً در غلظت ۰/۰۹ تولید موج در فواصل بزرگتر نسبت به فاصله های کوچک خیلی تغییر می کند. از این رو، تاثیر اختلاف بین غلظت ها در فاصله های بزرگ بیشتر خودش را نشان می دهد. دلیل بعدی مربوط به این موضوع می باشد که در فاصله های بزرگ بسامد مشخصه موهومی سامانه کوچک می شود. از این رو، اهمیت جملات مرتبط به بسامدهای کوچک در نیرو بیشتر می شود. پس بدون شک اهمیت جمله بسامد صفر نیز بیشتر است. بیش از این بیان شد تاثیر نفوذپذیری مغناطیسی تنها در بسامد صفر ماسوبارا می باشد [۲۳, ۲۴, ۳۲]. از طرفی μ متناسب است با غلظت پس تفاوت بین μ ها در فاصله های بزرگ به صورت چشمگیر خودشان را نشان می دهند. دیده می شود که افزایش μ فروسیال منجر به افزایش نیروی کاسیمیر خواهد شد.



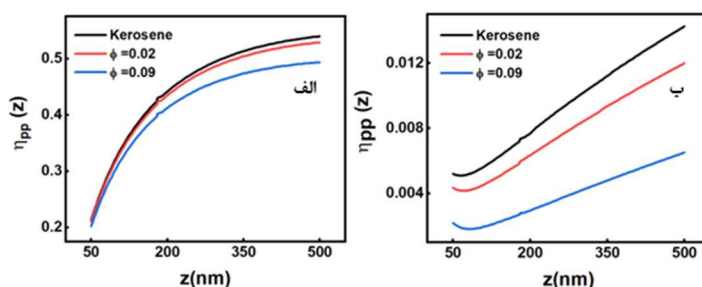


Fig. 6 Reduction factor vs distance between the plates made of (a) gold, and (b) silica.

Ferrofluid at various concentration is considered as intermediate layer.

شکل ۶ بزرگی عامل کاهش نسبت به فاصله صفحات از جنس (الف) طلا و (ب) سیلیکا (مشخصات لایه میانی در شکل نشان داده شده است).

• بررسی قطره‌های متفاوت نانوذرات در لایه میانی بر نیروی کاسیمیر

در شکل (۷) در سیال مغناطیسی غلظت نانوذرات ثابت در نظر گرفته شده است و قطر آن‌ها (D) تغییر می‌کند. در معادلات ماکسول تاثیر الکتریکی مواد با استفاده از تابع دی‌الکتریک وارد آن‌ها می‌شود و این در حالی است که الگوی در نظر گرفته شده تابع دی‌الکتریک جدا از قطر نانو ذرات می‌باشد. همانطور که بیان شد، در این مرحله غلظت نانوذرات ثابت در نظر گرفته شد، در نتیجه حجم نانوذرات به حجم کل ثابت می‌باشد. از این رو، با افزایش قطر چون غلظت ثابت است، تعداد نانو ذرات Fe_3O_4 کم می‌شود. وقتی تعداد نانوذرات کم شود، شدت موجی که در لایه میانی تولید می‌شود، کمتر شده و در نتیجه اختلاف فشار بیرون و بین صفحات زیاد می‌شود. نیرو نیز با افزایش قطر زیاد می‌شود. این مطلب در فواصل کم ضعیف تر است، اما در فاصله‌های زیاد با افزایش تاثیر μ این موضوع کاملاً قابل مشاهده می‌باشد.

باید توجه داشت بروز تاثیرات μ وابسته به قدرت دی‌الکتریک است. در سامانه‌هایی که قدرت تابع دی‌الکتریک کم می‌باشد، تاثیرات μ می‌تواند چشمگیر باشد. به عنوان مثال، در سیلیکا که نسبت به طلا دارای دی‌الکتریک ضعیف تر است، بسامد صفر ماتسوبارا و μ توانسته از ابتدا در فاصله‌های کوچک خودش را نشان دهد اما در طلا به دلیل اینکه دی‌الکتریک بسیار قوی دارد حتی در فاصله‌های زیاد شاهد اختلاف محسوس بین نمودارها و اعمال اثر μ نخواهیم بود.

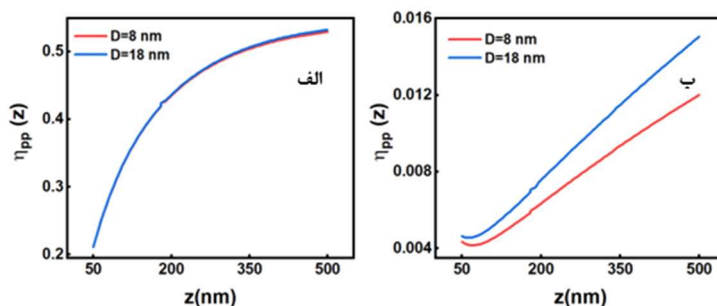


Fig. 7 Reduction factor vs distance between the plates made of (a) gold and (b) silica. Ferrofluid at concentration of 0.02 with various diameter of the nanoparticle is considered as intermediate layer.

شکل ۷: بزرگی عامل کاهش نسبت به فاصله صفحات از جنس (الف) طلا و (ب) سیلیکا و لایه میانی کروسین و سیال مغناطیسی با نانوذرات به غلظت ثابت ۰.۰۲ (قطر نانوذرات در شکل نشان داده شده است).

۳.۳. قطر بحرانی و تاثیر نداشتن نانوذرات بر نیروی کاسیمیر

نشان داده شد وقتی لایه میانی بین صفحات سیال مغناطیسی می باشد با افزایش غلظت (در قطر ثابت) نیرو کم می شود و با افزایش قطر (در غلظت ثابت) نیرو زیاد می شود. از این رو، می توانیم در یک غلظت ثابت قطر را افزایش دهیم. به صورتی که در یک قطر بحرانی نیروی کاسیمیر برابر با حالتی که لایه میانی شامل نانوذره نیست (سیال غیرمغناطیسی) شود. در شکل (۸-الف) نانوذرات به قطر ۸ نانومتر را با غلظت ۰.۰۲ به کروسین می افزاییم. مشاهده می شود با توجه به مطالبی که گفته شد، نیروی کاسیمیر نسبت به زمانی که لایه میانی کروسین است، کم می شود. حال در همان غلظت قطر را زیاد می کنیم (شکل (۸-ب)). مشاهده می شود که باز هم نیروی کاسیمیر نسبت به زمانی که لایه میانی کروسین در نظر گرفته شود، تغییر می کند. اگرچه، این تغییر نیرو نسبت به سامانه دارای نانوذرات به قطر ۸ نانومتر کمتر می باشد. چرا که بر اساس آنچه گفته شد، در غلظت ثابت با افزایش قطر، نیرو قوی تر می شود. با توجه به شکل در یک فاصله مشخص بین صفحات، مقدار نیرو با زمانی که لایه میانی کروسین در نظر گرفته شده است، یکسان می شود. به این معنی که در آن فاصله با اینکه وجود نانوذرات هیچ گونه تغییری در نیروی کاسیمیر نسبت به زمانی که لایه میانی کروسین است، نداریم. در واقع نانوذرات با این قطر نتوانستند تغییری در بزرگی نیروی کاسیمیر ایجاد کنند.



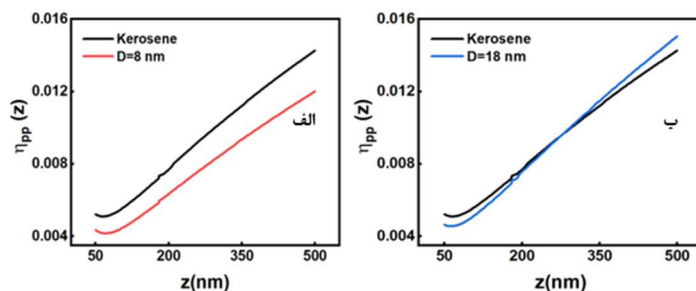


Fig. 8 Reduction factor vs distance between silica plates at room temperature. Ferrofluid at concentration of 0.02 with various diameter of the nanoparticle is considered as intermediate layer.

شکل ۸ بزرگی عامل کاهش نسبت به فاصله بین صفحات سیلیکا در دمای اتاق، لایه میانی کروسین و سیال مغناطیسی با نانو ذرات به غلظت ثابت ۰.۰۲ (قطر نانوذرات در شکل نشان داده شده است).

در شکل (۹) محور افقی فاصله بین صفحات و محور عمودی قطر بحرانی ثابت نانوذرات را نشان می‌دهد. در بررسی این شکل می‌توان بیان کرد که وابستگی μ و غلظت نانوذرات (Φ) خطی است. در نتیجه افزایش غلظت سبب افزایش μ خواهد شد. همچنین μ با توان سوم قطر نیز متناسب است، از این رو، تغییرات قطر به صورت چشمگیر موثر بر بزرگی μ خواهد بود. در غلظت بالا چون مقدار و همچنین نرخ رشد μ شدید است، در قطرهای کوچکتر به مقدار بحرانی قطر می‌رسیم. به همین دلیل در شکل (۹)، در هر دو قسمت (الف) و (ب) مشاهده می‌شود در تمام فاصله‌ها قطر بحرانی برای غلظت ۰.۰۵ کمتر از غلظت ۰.۰۲ است.

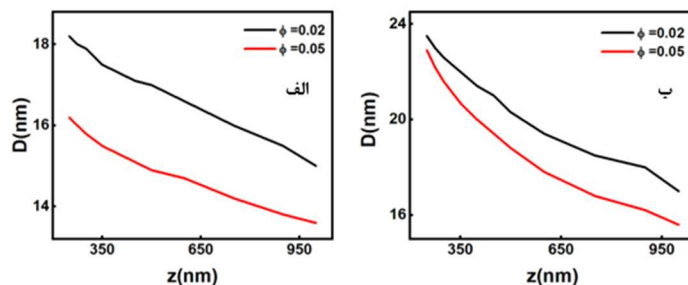


Fig. 9 Magnitude of the critical diameter of nanoparticles vs the distance between the plates made of (a) silica and (b) silicon carbide. ferrofluid at various concentration is considered as intermediate layer.

شکل ۹ بزرگی قطر بحرانی نانوذرات نسبت به فاصله بین صفحات از جنس (الف) سیلیکا و (ب) سیلیکون کرباید (غلظت‌های نانوذرات در شکل نشان داده شده است).

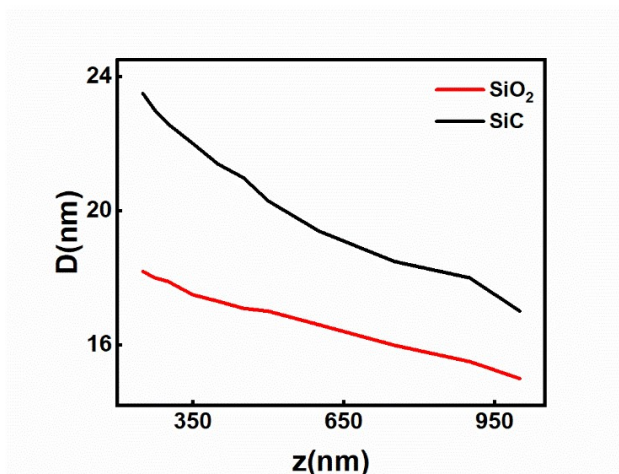


Fig. 10 Magnitude of the critical diameter of nanoparticles vs the distance. Ferrofluid at concentration of 0.02 is considered as intermediate layer in MEMS. the material is indicated.

شکل ۱۰ بزرگی قطر بحرانی نانوذرات نسبت به فاصله با نانوذرات به غلظت ثابت ۰/۰۲ (جنس صفحات در شکل نشان داده شده است).

شکل (۱۰) وابستگی قطر بحرانی را به ویژگی‌های اپتیکی میکروسامانه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود در غلظت ثابت نانوذرات، قطر بحرانی در همه فاصله‌ها در میکروسامانه شامل سیلیکون کرباید نسبت به سیلیکا مقدار بیشتری دارد. این موضوع به این دلیل است که تابع دی‌الکتریک سیلیکون کرباید قوی‌تر از سیلیکا است. بر اساس آنچه در شکل (۶) مشاهده شد، تاثیر تبدیل لایه وسط از کرو سین به سیال مغناطیسی بر تغییر نیروی کاسیمیر در میکروسامانه کمتر می‌باشد. از این‌رو، برای جبران این تغییر کوچک در نیرو نیاز به حضور تعداد کمی از نانوذرات است و همین موضوع منجر شده است که مقادیر قطر بحرانی در میکروسامانه شامل سیلیکون کرباید بزرگتر باشد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، نیروی کاسیمیر در یک میکروسامانه سه لایه در دمای اتاق (۳۰۰ کلوین) بین صفحات موازی به دور از هرگونه زبری از جنس طلا، سیلیکون کرباید و سیلیکا به منظور در نظر گرفتن تاثیر ویژگی‌های اپتیکی متفاوت، با استفاده از نظریه لیفشیتز بررسی شده است. براساس این نظریه، تاثیر ویژگی‌های اپتیکی بر مقدار نیرو از راه تابع دی‌الکتریک و نفوذپذیری مغناطیسی اجزای سامانه بیان می‌شود. محاسبات در فواصل ۵۰ تا ۵۰۰ نانومتری بین صفحات انجام گردیده است. لایه میانی سیال مغناطیسی که تشکیل شده است از مایع حامل و نانوذرات مغناطیسی فرض شد. این نانوذرات دارای



ویژگی مهم نفوذپذیری مغناطیسی ذاتی هستند. به منظور بررسی اثر سیال مغناطیسی بر بزرگی نیروی کاسیمیر ابتدا افزایش غلظت نانوذرات را در قطر ثابت و سپس افزایش قطر نانوذرات در غلظت ثابت در نظر گرفته شده است و نیروی کاسیمیر برای محدوده فاصله در نظر گرفته شده با جنس صفحات متفاوت مورد بحث و بررسی قرار گرفته شده است.

بررسی نتایج بدست آمده در مورد نیروی کاسیمیر نشان می‌دهد که حضور ماده به عنوان لایه میانی در سامانه‌های سه لایه سبب کاهش نیروی کاسیمیر نسبت به حالتی که بین صفحات خلاء است می‌شود. با در نظر گرفتن سیال مغناطیسی در لایه میانی به دلیل وجود نفوذپذیری ذاتی نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 در این سیال، کاهش بیشتری در نیروی کاسیمیر رخ می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که هرچه غلظت نانوذرات در قطر ثابت بالاتر در نظر گرفته شود، تابع دی‌الکتریک سیال مغناطیسی افزایش یافته و بر کاهش نیرو تأثیر می‌گذارد. همچنین در غلظت ثابت افزایش قطر نانوذرات تأثیر قابل توجهی بر افزایش نیروی کاسیمیر دارد. در نظر گرفتن قطر بیشتر در غلظت ثابت منجر به کاهش تعداد نانوذرات شده و پس از آن، نیرو افزایش می‌یابد. یک اثر جالب که برای سامانه‌های سه لایه با لایه میانی سیال مغناطیسی دیده شد این است که در یک فاصله ثابت بین صفحات، افزودن نانوذرات مغناطیسی با قطر مشخص به مایع حامل (کروسین) در یک غلظت مشخص تأثیری بر نیروی کاسیمیر بین صفحات نسبت به زمانی که لایه میانی کروسین باشد، ندارد. در نتیجه، می‌توان گفت که نتایج این مطالعه می‌تواند کمک شایانی به میکروسامانه‌هایی که ایجاد اثرات مغناطیسی در آن‌ها لازم است، داشته باشد. اما محدوده دینامیک پایدار آن‌ها و در نتیجه بزرگی نیروی کاسیمیر تغییری نداشته باشد همچنین فرصت‌هایی را برای کنترل دقیق نیروی کاسیمیر در سامانه‌های سه لایه با یک لایه میانی سیال مغناطیسی فراهم می‌کند که در نسل بعدی میکروسامانه‌های مبتنی بر فروسیال می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

۵. تقدیر و تشکر

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

منابع

- [1] Rodriguez, A.W., Capasso, F. and Johnson, S.G., "The Casimir effect in microstructured geometries", *Nature photonics* 5(4), 211-221, 2011. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2011.39>
- [2] Capasso, F., Munday, J.N., Iannuzzi, D. and Chan, H.B., "Casimir forces and quantum electrodynamical torques: Physics and nanomechanics", *IEEE Journal of Selected*



- Topics in Quantum Electronics* 13(2), 400-414, 2007. <https://doi.org/10.1109/jstqe.2007.893082>
- [3] Huang, Kerson. *Fundamental Forces of Nature: The story of gauge fields*. World Scientific, 2007. https://doi.org/10.1142/9789812770714_0008
- [4] Saga, N. and Nakamura, T., "Elucidation of propulsive force of microrobot using magnetic fluid", *Journal of Applied Physics* 91(10), 7003-7005, 2002. <https://doi.org/10.1063/1.1452197>
- [5] Goubault, C., Jop, P., Fermigier, M., Baudry, J., Bertrand, E. and Bibette, J., "Flexible magnetic filaments as micromechanical sensors", *Physical review letters* 91(26), 260802, 2003. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.260802>
- [6] Broer, W., "The Casimir force and micro-electromechanical systems at submicron-scale separations", (2014). Electronic ISBNs: 978-90-367-7464-2
- [7] Tajik, F., "Casimir torques and lateral forces: influence of optical properties and surface morphology", (2018). Electronic ISBNs: 978-94-034-0818-7
- [8] Zhabinskaya, D., "Casimir interactions between scatterers in carbon nanotubes", PhD diss., University of Pennsylvania, 2009.
- [9] Bordag M., Klimchitskaya G. L., Mohideen U., and Mostepanenko V. M., *Advances in the Casimir effect*. PhD Thesis, Oxford university press, 2009.
- [10] Ekinci, K.L. and Roukes, M.L., "Nanoelectromechanical systems", *Review of scientific instruments* 76(6), 2005. <https://doi.org/10.1063/1.1927327>
- [11] Casimir, H.B. and Polder, D., "The influence of retardation on the London-van der Waals forces", *Physical Review* 73(4), 360, 1948. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.73.360>
- [12] Dzyaloshinskii, I.E.E., Lifshitz, E.M., Pitaevskii, L.P. and Priestley, M.G., "The general theory of van der Waals forces", In *Perspectives in Theoretical Physics*, 443-492. Pergamon, 1992. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-036364-6.50039-9>
- [13] Geyer, B., Klimchitskaya, G.L. and Mostepanenko, V.M., "Thermal Casimir interaction between two magnetodielectric plates", *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics* 81(10), 104101, 2010. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.81.104101>
- [14] Hasan, M.Z. and Kane, C.L., "Colloquium: topological insulators", *Reviews of modern physics* 82(4), 3045-3067, 2010. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.3045>
- [15] Moore, J.E., "The birth of topological insulators", *Nature* 464(7286), 194-198, 2010. <https://doi.org/10.1038/nature08916>
- [16] Tajik, F., Babamahdi, Z., Sedighi, M. and Palasantzas, G., "Nonlinear Actuation of Casimir Oscillators toward Chaos: Comparison of Topological Insulators and Metals", *Universe* 7(5), 123, 2021. <https://doi.org/10.3390/universe7050123>
- [17] Tajik, F., Allameh, N., Masoudi, A.A. and Palasantzas, G., "Nonlinear actuation of micromechanical Casimir oscillators with topological insulator materials toward chaotic motion: Sensitivity on magnetization and dielectric properties", *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* 32(9), 2022. <https://doi.org/10.1063/5.0100542>
- [18] Ashourvan, A., Miri, M. and Golestanian, R., "Rectification of the lateral Casimir force in a vibrating noncontact rack and pinion", *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* 75(4), 040103, 2007. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.75.040103>
- [19] DelRio, F.W., De Boer, M.P., Knapp, J.A., David Reedy Jr, E., Clews, P.J. and Dunn, M.L., "The role of van der Waals forces in adhesion of micromachined surfaces", *Nature materials* 4(8), 629-634, 2005. <https://doi.org/10.1038/nmat1431>
- [20] Serry, F.M., Walliser, D. and Maclay, G.J., "The role of the Casimir effect in the static deflection and stiction of membrane strips in microelectromechanical systems (MEMS)", *Journal of Applied Physics* 84(5), 2501-2506, 1998. <https://doi.org/10.1063/1.368410>



- [21] Tajik, F., Sedighi, M. and Palasantzas, G., "Sensitivity of actuation dynamics on normal and lateral Casimir forces: Interaction of phase change and topological insulator materials", *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* 31(10), 2021. <https://doi.org/10.1063/5.0065033>
- [22] Munday, J.N., Capasso, F., Parsegian, V.A. and Bezrukov, S.M., "Measurements of the Casimir-Lifshitz force in fluids: The effect of electrostatic forces and Debye screening", *Physical Review A—Atomic, Molecular, and Optical Physics* 78(3), 032109, 2008. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.78.032109>
- [23] Klimchitskaya, G.L., Mostepanenko, V.M., Nepomnyashchaya, E.K. and Velichko, E.N., "Impact of magnetic nanoparticles on the Casimir pressure in three-layer systems", *Physical Review B* 99(4), 045433, 2019. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.045433>
- [24] Velichko, E.N., Klimchitskaya, G.L. and Mostepanenko, V.M., "Dispersion forces between metal and dielectric plates separated by a magnetic fluid", *Technical Physics* 64, 1260-1266, 2019. <https://doi.org/10.1134/S1063784219090214>
- [25] Velichko, E.N., Klimchitskaya, G.L. and Nepomnyashchaya, E.N., "Casimir effect in optoelectronic devices using ferrofluids", *Journal of Electronic Science and Technology* 18(1), 100024, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jnlest.2020.100024>
- [26] Obrecht, J.M., Wild, R.J., Antezza, M., Pitaevskii, L.P., Stringari, S. and Cornell, E.A., "Measurement of the temperature dependence of the Casimir-Polder force", *Physical review letters* 98(6), 063201, 2007. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.063201>
- [27] Nasiri, Z., Aali, M. and Tajik, F., "Influence of Thermal Fluctuation on Attractive and Repulsive Casimir Forces in Microsystem with Topological Insulator Material", *Iranian Journal of Applied Physics* 14(2), 128-144, 2024. <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.45814.1374>
- [28] Dadi, Z., Masoudi, A.A., Tajik, F. and Palasantzas, G., "Influence of optical property contrast on the critical distribution of electrostatic torques in double-beam torsional Casimir actuators: Non-linear actuation toward chaotic motion", *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* 33(11), 2023. <https://doi.org/10.1063/5.0168044>
- [29] Tajik, F. and Palasantzas, G., "Dynamical Sensitivity of Three-Layer MEMS to the Optical Properties of the Intervening Liquid Layer", (2023). <https://doi.org/10.20944/preprints202309.1995.v1>
- [30] Sedighi, M., Svetovoy, V.B., Broer, W.H. and Palasantzas, G., "Casimir forces from conductive silicon carbide surfaces", *Physical Review B* 89(19), 195440, 2014. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.89.195440>
- [31] Hong, C.Y., Jang, I.J., Horng, H.E., Hsu, C.J., Yao, Y.D. and Yang, H.C., "Ordered structures in Fe₃O₄ kerosene-based ferrofluids", *Journal of applied physics* 81(8), 4275-4277, 1997. <https://doi.org/10.1063/1.364800>
- [32] Mirzaei, M., Masoudi, A.A., Tajik, F. and Palasantzas, G., "Dynamical sensitivity of a three-layer microsystem under the influence of the Casimir force in a ferrofluid", *Chaos, Solitons & Fractals* 189, 115637, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2024.115637>



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/>).

