



Islamic Azad University , Shiraz Branch

نشریه تحلیل مدارها، داده ها و سامانه ها
Journal of Circuits, Data and Systems Analysis

sanad.iau.ir/journal/jcda



Trapping polystyrene particles using plasmonic tweezers

Ebrahim Fooladi¹, Mojtaba Sadeghi^{2*}, Zahra Adelpour², Farhad Bahadori-Jahromi¹

¹ Department of Electrical Engineering, Fasa Branch, Islamic Azad University, Fasa, Iran
Fooladi57@gmail.com, bahadori.fr@gmail.com

²Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran
sadeghi@unam.bilkent.edu.tr, adelpour@iaushiraz.ac.ir

Abstract: This research analyzes and examines the use of plasmonic tweezers in the field of biotechnology, focusing on an inclined twine-core plasmonic optical fiber tweezer. This tweezer was designed and modeled using COMSOL software and through numerical simulations, it exhibits its capacity to trap polystyrene particles on a nano-scale. The results obtained from the research show that changes in different parameters such as the wavelength used, the radius of the trapped particle, and the refractive index of the medium used, lead to changes in the trapping force. The increase in the refractive index of the environment and the dimensions of the particles causes a significant increase in the applied force, especially in short wavelengths, the problem is more visible. These findings show that the proposed plasmonic structure has a very high trapping force, and this has the ability to significantly improve compared to previous researches. These advances in the field of biotechnology not only allow for more accurate and effective manipulation of nanoscale particles, but also facilitate the creation of new technologies in the field of medicine and other biological sciences. These developments will directly and indirectly help to improve diagnostic and treatment systems.

Keywords: Optical fiber, Twin-core, Plasmonic, Tweezers, Trapping.

JCDSA, Vol. 2, No. 5, Spring 2024
Received: 2024-04-18

Online ISSN: 2981-1295
Accepted: 2024-06-10

Journal Homepage: <https://sanad.iau.ir/en/Journal/jcda>
Published: 2024-06-18

CITATION

Fooladi, E., et. al., "Trapping polystyrene particles using plasmonic tweezers", Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA), Vol. 2, No. 5, pp. 26-33, 2024.
DOI: 00.00000/0000

COPYRIGHTS



©2024 by the authors. Published by the Islamic Azad University Shiraz Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

* Corresponding author

Extended Abstract

Introduction

In the era of the plasmonic revolution, the use of nanoparticles in biotechnology has been recognized as a tool for scientific and technological innovations. Research studies have shown that the physical and chemical properties of nanoparticles are significantly influenced by particle size. Noble metals like silver and gold, when approaching the nanoscale, exhibit very strong absorption due to the oscillation of conduction band electrons between the nanoparticle surfaces, a phenomenon known as surface plasmon resonance. The remarkable optical properties created by gold nanoparticles have historically been used for decorating church windows and ornamental items, as seen in ancient objects like the Lycurgus Cup, which displays dichroism based on whether light shines from the front or the back. The color filtering effect caused by light scattering and absorption by nanoparticles is significant and clearly observable in the visible wavelength range.

Governing Theory

The optical tweezer with a dual-core fiber includes a single-mode fiber, a Mach-Zehnder interferometer, and a dual-core fiber as the main components of the study, using gold and air as the core and cladding to enhance particle trapping. The image of this setup is like a Mach-Zehnder interferometer with square function. The reason for choosing a conical structure is due to the convergence of light beams and the creation of a high gradient intensity at the tip of the optical tweezer, as well as the increase in trapping force at the tip of the plasmonic tweezer.

Simulation

In this section, the design and simulation of a dual-core plasmonic optical tweezer in the COMSOL environment are presented. Additionally, the behavior, gradient forces, and scattering forces are precisely calculated and analyzed. The use of plasmonic metallic nanostructures with localized surface plasmon resonance (LSPR) indicates significant achievements in particle trapping. The strong and focused fields, especially in metallic nanostructures with LSPR, can effectively act as nanoantennas. In this research, a conical dual-core plasmonic optical tweezer is designed and simulated to trap nanoparticles. The primary objective of this study is to enhance the optical gradient force in the system. To achieve this goal, the light field distribution from the tip of the conical fiber is calculated using the finite element method, and the electric field intensity and the system's gradient force are accurately examined and evaluated. This research is fundamentally focused on the development of optical technologies to improve the efficiency of trapping and controlling nanoparticles. The simulation of the structure is performed using COMSOL software

Structure Design

The design is based square equation. The structure was designed in the COMSOL software, with a port placed at the left input of the structure and a port at the output to measure the power transfer from the input to the output of the structure. Since the structure and excitation mode are TM mode, the port settings are configured for TM mode, and the wavelength is varied from 1 to 2 micrometers to analyze the results.

Results

In this study, the effect of particle size on the trapping forces in the plasmonic tweezers system was carefully examined. The results showed that with the increase in particle size, the calculated force in the x-direction also increases. This change in forces indicates the significant role that particle size plays in increasing or decreasing the trapping forces. Interestingly, with a several-fold increase in particle radius, it was observed that the amount of trapping force decreases. This change in force behavior shows that with an increase in particle size, the required laser power also decreases. Specifically, larger particles require more laser power. Consequently, the conducted studies emphasize that the physical properties of particles play an important role in the optical trapping phenomenon of this system, and this information can be used as a powerful tool to improve the performance of light-based technologies and their various applications. The proposed structure in this study has been able to create a considerable force for particles with a size of 10 nanometers. This is related to the resonance of surface plasmons and indicates the structure's ability in optical trapping and manipulation of nanoparticles. In general, this study clearly states that changes in particle properties and the optical properties of the environment have a direct impact on the trapping forces in the plasmonic tweezers system, and this knowledge is valuable for improving optical technologies and their various applications.

Conclusion

Surface plasmon polaritons are excited by surface electrons at the interface between a metal and a dielectric. Due to their mechanical capabilities at scales much smaller than the wavelengths of ordinary light, they have found numerous applications in nanophotonics. This article examines the significant applications of these polaritons in optically trapping dielectric nanoparticles using plasmonic optical tweezers. Plasmonic optical tweezers can create strong local fields at their tips and enhance optical fields, enabling the trapping of particles much smaller than the diffraction limit. This capability makes them a desirable option for producing plasmonic optical tweezers at the nanoscale. Plasmonic optical tweezers can trap smaller particles compared to conventional optical tweezers and make sub-diffraction limit trapping possible.





به دام انداختن ذرات پلی استایرن با استفاده از انبرک پلاسمونیک

ابراهیم فولادی^۱، مجتبی صادقی^{۲*}، زهرا عادل پور^۳، فرهاد بهادری جهرمی^۳

۱- گروه مهندسی برق، واحد فسا، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران (fooladi57@yahoo.com, bahadori.fr@gmail.com)

۲- گروه مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران (sadeghi@unam.bilkent.edu.tr, adelpour@aut.ac.ir)

چکیده: این تحقیق به تحلیل و بررسی استفاده از انبرک های پلاسمونیک در زمینه بیوتکنولوژی با تمرکز بر روی یک انبرک فیبرنوری دو هسته ای پلاسمونیک متمایل می پردازد. این انبرک با استفاده از نرم افزار کامسول طراحی و مدل سازی شده و توسط شبیه سازی های عددی، ظرفیت خود در به دام اندازی ذرات پلی استایرن در مقیاس نانو را به معرض نمایش می گذارد. نتایج به دست آمده از تحقیق نشان می دهد که تغییرات در پارامترهای مختلف هم چون طول موج مورد استفاده، شعاع ذره به دام افتاده، و ضریب شکست محیط مورد استفاده، به تغییر در نیروی به دام انداز منجر می شود. افزایش ضریب شکست محیط و ابعاد ذرات باعث افزایش چشم گیر در نیروی اعمالی می گردد، به ویژه در طول موج های کوتاه این مسئله نمایان تر است. این یافته ها نشان می دهد که ساختار پلاسمونیک پیشنهادی دارای نیروی به دام انداز بسیار بالاست و این امر قابلیت ارتقاء محسوسی نسبت به تحقیقات قبلی را داراست. این پیشرفت ها در زمینه بیوتکنولوژی نه تنها امکان دستکاری دقیق تر و اثربخش تر ذرات در مقیاس نانو را ایجاد می نمایند، بلکه ایجاد فناوری های نوین در حوزه پزشکی و دیگر علوم زیستی را تسهیل می دهند. این پیشرفت ها به طور مستقیم و غیر مستقیم به بهبود سیستم های تشخیصی و درمانی نیز کمک خواهند کرد.

واژه های کلیدی: فیبر نوری، دو هسته ای، پلاسمونیک، انبرک، به دام اندازی.

DOI: 00.00000/0000

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۱

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۳۰

فشار تابشی و نیروی تابشی، که از معادلات ماکسول^۲ ناشی می شوند، همراه با برهم کنش نور و دیپول های القایی درون ذره، منبع لازم برای به دام اندازی ذرات کوچک را فراهم می آورند؛ که به آن ها "انبرک نوری"^۳ می گویند. تحقیقات در این زمینه از زمانی که توسط اشکین و همکارانش [۱۰] در سال ۱۹۷۰ تحقق یافت، پیشرفت شگفت انگیزی کرده است. امروزه انبرک های نوری، ابزاری بسیار کاربردی در زمینه های علوم پزشکی و زیستی هستند، که برای دستکاری مواد زیستی در مقیاس های کوچک، چون سلول ها [۱۱]، باکتری ها [۱۲] و DNA های کروم [۱۳،۴] به کار می روند. دستاوردهای اخیر در این حوزه نیاز به کنترل دقیق تر ذرات زیستی کوچک تر را نشان می دهد، که این به دام انداختن، در مقیاس های نانومتری بسیار دشوارتر است؛ عمدتاً به دلیل کاهش نیروی تابشی نسبت به حرارت تصادفی و براونی حرکت کرده اند. تله اندازی با استفاده از نانوساختارهای پلاسمونی، بدون نیاز به تجهیزات اپتیکی پیچیده انجام می شود. این روش، برای کاربردهای آزمایشگاهی روی تراشه و در سیستم های میکروفلوئیدی، به صورت ساده و مؤثر مورد استفاده قرار می گیرد. این تحقیقات نخستین بار بر روی پلاسمون سطحی برای تله اندازی ذرات با استفاده از فصل مشترک

۱- مقدمه

در عصر انقلاب پلاسمونیک، استفاده از نانوذرات در بیوتکنولوژی به عنوان ابزاری برای ایجاد نوآوری های علمی و فناوری شناخته شده است. مطالعات تحقیقاتی نشان داده اند که خواص فیزیکی و شیمیایی نانوذرات به طور چشم گیری تحت تأثیر اندازه ذره قرار دارند [۱]. فلزات نجیب مانند نقره و طلا با نزدیک شدن به مقیاس نانو، نشان دهنده جذب بسیار قوی ناشی از نوسان الکترون های باند هدایت بین سطوح نانوذرات هستند؛ که این پدیده به عنوان جذب پلاسمون سطحی شناخته می شود [۲-۴]. ویژگی های نوری چشم گیری که توسط نانوذرات طلا ایجاد می شود، از دوران گذشته استفاده هایی هم چون تزئین پنجره های کلیساها یا وسایل تزئینی داشته اند و در اشیاء باستانی مانند جام لیکرگوس مشاهده شده اند؛ که این پدیده دو رنگی را بر اساس تابش نور از جلو یا پشت ایجاد می کند [۵]. اثر صافی سازی رنگی [۶] ناشی از پراکنده سازی و جذب نور توسط نانوذرات، بسیار حائز اهمیت است و به وضوح در محدوده طول موج مرئی قابل مشاهده است [۷-۹].

* نویسنده مسئول

² Maxwell equations

³ optical tweezer

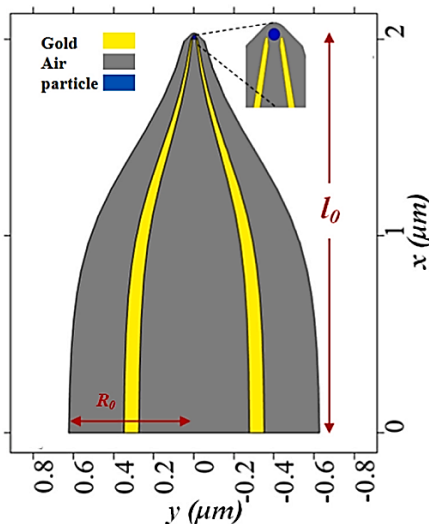


تصویر این انبرک در شکل (۱) نمایش داده شده است. دلیل انتخاب ساختار مخروطی به علت همگرایی پرتوهای نوری و ایجاد شدت گراپیان بالا در نوک انبرک نوری و همچنین افزایش نیروی تله گذاری در نوک انبرک پلاسمونی می باشد. شرح کامل مشخصات و مقدار در نظر گرفته شده برای هر پارامتر در جدول (۱) نشان داده شده است. قطر هر هسته $0.37 \mu\text{m}$ میکرومتر تعیین شده است. یک کره پلی استایرن با قطر $5 \mu\text{m}$ نانومتر و ضریب شکست 1.49 به عنوان ذره ای که به رنگ آبی در شکل (۱) نشان داده شده است، در نظر گرفته شده است. ثابت دی الکتریک طلا از طریق مدل درود-لورنتس در نظر گرفته شده است که طبق (۲) است.

$$\varepsilon(\omega) = \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}\right) \quad (2)$$

که در آن ε_∞ نفوذپذیری نسبی در فرکانس بی نهایت است. همچنین، ω_p و γ به ترتیب فرکانس پلاسمای حجمی و فرکانس میرایی نوسانات هستند. با در نظر گرفتن مد انتشار TM در بیرون ساختار به دلیل اثر پلاسمونیک آن، نیروی فشار تابشی محوری (جهت y) و عرضی (جهت x) برای کره میکروسکوپی با روابط زیر محاسبه می شود [۳۲].

$$F_x = \frac{1}{2} \int_S \left[-\frac{1}{2} \left(\mu\mu_0 |H_z|^2 + \varepsilon_0 \varepsilon_1 |E_y|^2 - \varepsilon_0 \varepsilon_1 |E_x|^2 \right) dy + \mu\mu_0 \operatorname{Re}(E_y E_x^*) dx \right] \quad (3)$$



شکل (۱): نمای برش مقطعی فیبر دو هسته ای پیشنهادی

جدول (۱): پارامترهای مربوط به فیبر مخروطی مطابق معادله (۱).

پارامتر	توصیف	مقدار (میکرون)
R_0	شعاع فیبر دو هسته ای	۰/۶۲۵
r_0	شعاع میکرو لنز نیم کره ای	۰/۲۵
l_0	طول فیبر مخروطی	۲/۰۱۵
L	ضریب ثابت	۲/۸۸

آب/طلا انجام شده است، که در سال ۲۰۰۶ تله اندازی ذرات دی الکتریک میکرومتری در سطح طلا با برانگیختن پلاسمون های سطحی گزارش شده است [۱۷-۱۵].

در زمینه تله اندازی با استفاده از نانوساختار های پلاسمونی روش های مختلفی به کار گرفته شده است. آنتن های پلاسمونی، یکی از این روش هاست. آنتن ها معمولاً از دو استوانه یکسان تشکیل شده اند که توسط یک شکاف دی الکتریک نانومتری از هم جدا شده اند. وقتی که میدان تابشی در راستای اتصال دو ذره قطبی می شود، اثرات خازنی باعث جایگزیده شدن نور و افزایش شدت آن در ناحیه شکاف می شود [۱۸ و ۱۹]. در روش مجتمع سازی تله های پلاسمونی در ساختار میکروشاره که برای اولین بار در سال ۲۰۰۹ معرفی شده است، از یک تراشه میکروشاره پلاسمونی سه لایه برای تله اندازی ذرات کره ای از جنس پلی استایرن و سلول های مخمر استفاده شده است [۲۰]. همچنین در سال ۲۰۰۹ با استفاده از پلاسمون پلاریتون های سطحی و هم پوشانی میدان نزدیک ذرات طلا و لایه طلا، افزایش قابل ملاحظه ای در نیروهای نوری گزارش شد. در این ساختار نور تحت بازتابش کلی با طول موج 980 nm نانومتر با زوایای مختلف، به فصل مشترک شیشه و طلا به ضخامت 55 nm نانومتر برخورد می کند. ذرات طلا به قطر 250 nm نانومتر شناور در آب بالای لایه طلا قرار داده می شوند [۲۱]. روش دیگر استفاده از نانو روزنه ها به منظور به دام انداختن است [۲۲-۳۱]. در میان ساختار نانو روزنه های پلاسمونی، اخیراً ساختار جفت نانوحفره ها پیشنهاد شده که با بهره گیری از اثر SIBA نتایج نویدبخش و گسترده ای را در کنترل و مطالعه نانوکره های سیلیکا^۲ [۲۲]، تک پروتئین^۳ [۲۳]، چگالی حجمی از نانوذرات [۲۴]، پیوند پروتئین [۲۵، ۲۶] و شدت صلبیت تله [۲۷]، نوسان رامان^۴ یک نانوذره [۲۸]، مولکول های فلورسنس^۵ [۲۹]، مشخصه خطوط استوکس [۳۰] و نانوذرات سوپر مگنتیک [۳۱] تاکنون عرضه داشته است.

در این مقاله، ما بر تحقیق خود در زمینه انبرک های نوری پلاسمونی می پردازیم، که برای به دام انداختن و دست کاری نانوذرات پلی استایرن در محیط های مختلف به کار برده می شود. این دست کاری برای طیف وسیعی از کاربردها از جمله پزشکی، بیوتکنولوژی و الکترونیک قابل استفاده است. از پلاسمون های سطحی ناشی از فلزات نجیب مانند طلا استفاده می کنیم.

۲- تئوری حاکم

انبرک نوری با فیبر دو هسته ای شامل یک فیبر حالت تک، تداخل سنج ماخ زندر و فیبر دو هسته ای به عنوان بخش اصلی مطالعه است که برای تقویت دام ذرات، از طلا و هوا به عنوان هسته و پوشش استفاده می کند.

$$R(z) = \begin{cases} \frac{1}{2}(R_0 - r_0) - \frac{1}{2}(R_0 - r_0) \left\{ \frac{\tanh[V(Z - \frac{l_0}{2})]}{\tanh(V \frac{l_0}{2})} \right\}, 0 < Z < (l_0 - r_0) \\ \sqrt{r_0^2 - (Z - l_0)^2}, l_0 - r_0 < Z < l_0 \end{cases} \quad (1)$$

⁴ Raman oscillation

⁵ Fluorescent

¹ Plasmon-polariton

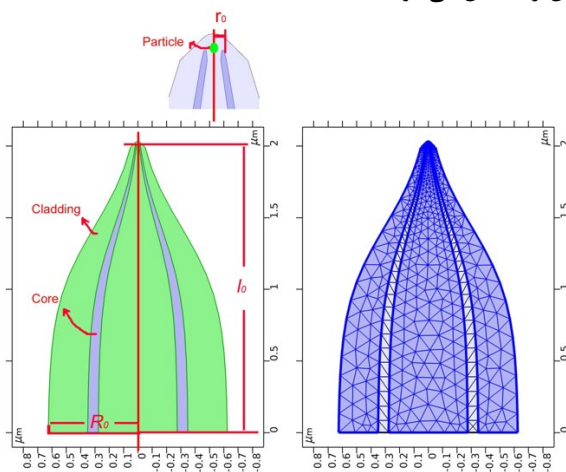
² Silica

³ Single protein

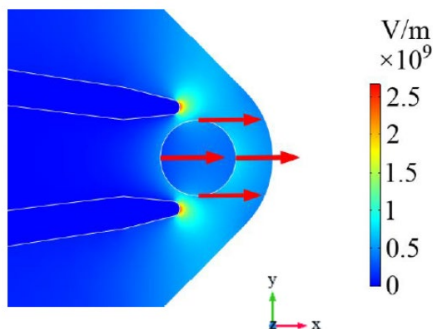


سطحی است. با این حال، با افزایش شعاع ذرات، نیروی تله کاهش می‌یابد و ذرات بزرگ‌تر به توان لیزر بیش‌تری نیاز دارند. بیش‌ترین مقدار نیرو در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر به‌دست آمده است.

تحلیل و مقایسه گسترده‌تری بر روی نتایج شبیه‌سازی صورت گرفته است که نتایج آن در شکل‌های (۵-۱۰) قابل مشاهده است. حالتی را در نظر گرفتیم که ذره پلی‌استایرنی در محیط آب با ضریب شکست ۱/۳۳ حرکت می‌کند. همچنین این حالت را با سه محیط دیگر با ضرایب شکست ۱/۳۵، ۱/۳۷ و ۱/۳۹ مقایسه کردیم. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، نشان می‌دهد که نیروی تله در محیط‌هایی با ضرایب شکست بالاتر، چندین برابر نسبت به محیط خلاء (ضریب شکست ۱) افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، افزایش ضریب شکست محیط به افزایش نیروی تله در انبرک پلاسمونی منجر می‌شود. در این مطالعه، تأثیر اندازه ذرات بر نیروهای تله در سیستم انبرک پلاسمونی به دقت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که با افزایش اندازه ذرات، نیروی محاسبه شده در جهت x نیز افزایش می‌یابد. این تغییر در نیروها نشان‌دهنده نقش بسیار حائز اهمیتی است که اندازه ذرات در افزایش یا کاهش نیروهای تله ایفا می‌کند. با افزایش چند برابری شعاع ذرات، جالب است که مشاهده شد، مقدار نیروی تله کاهش می‌یابد. این تغییر در رفتار نیروها نشان می‌دهد که با افزایش اندازه ذرات، توان لیزر مورد نیاز نیز کاهش می‌یابد. به طور خاص، در ذرات با شعاع بزرگ‌تر، نیاز به توان لیزر بیش‌تری حس می‌شود.



شکل (۲): (الف) هندسه و پارامترهای انبرک نوری پلاسمونیک دو هسته‌ای مخروطی طراحی شده؛ (ب) مش‌بندی ساختار مدل-سازی شده در کامسول



شکل (۳): توزیع میدان الکتریکی در موجبر

$$F_y = \frac{1}{2} \oint_S \left[-\frac{1}{2} \left(\mu\mu_0 |H_z|^2 + \varepsilon_0 \varepsilon_1 |E_x|^2 - \varepsilon_0 \varepsilon_1 |E_y|^2 \right) dx + \mu\mu_0 \operatorname{Re}(E_y E_x^*) dx \right] \quad (4)$$

در (۴)، S حد فاصل (کانتوری) است که سطح مقطع کره را در صفحه xOy می‌پوشاند.

۳- شبیه‌سازی

در این بخش، به طراحی و شبیه‌سازی یک انبرک فیبر نوری دو هسته‌ای پلاسمونیک در محیط کامسول پرداخته می‌شود. علاوه بر این، رفتار، نیروهای گرادیان و پراکندگی نیز به دقت محاسبه و مورد بررسی قرار می‌گیرند. بهره‌مندی از نانو ساختارهای فلزی پلاسمونیک با تشدید پلاسمون سطحی موضعی (LSPR) نشان‌دهنده دستاوردهای مهم در به دام انداختن ذرات است. میدان‌های قوی و متمرکز، به‌ویژه در نانو ساختارهای فلزی با LSPR، می‌توانند به‌عنوان نانوآنتن‌ها مؤثر عمل کنند. در این تحقیق، یک انبرک نوری فیبر دو هسته‌ای مخروطی پلاسمونیک به منظور به دام انداختن نانو ذرات طراحی و شبیه‌سازی شده است. هدف اصلی این پژوهش، بهبود نیروی گرادیان نوری در سیستم می‌باشد. برای دست‌یابی به این هدف، توزیع میدان نوری از نوک فیبر مخروطی با استفاده از روش المان محدود محاسبه شده و شدت میدان الکتریکی و نیروی گرادیان سیستم با دقت مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته‌اند. این تحقیق اساساً به توسعه فناوری‌های نوری جهت بهبود کارایی در به دام انداختن و کنترل نانو ذرات معطوف شده است. شبیه‌سازی ساختار با استفاده از نرم افزار کامسول صورت گرفته است که در شکل (۲) قابل مشاهده است.

۴- طراحی ساختار

طراحی بر اساس (۲) صورت گرفته و ساختار در نرم افزار کامسول طبق شکل (۲) طراحی شده است. با قرار دادن یک پورت در ورودی سمت چپ ساختار و یک پورت در خروجی ساختار، بررسی می‌شود چه توانی از ورودی به خروجی ساختار انتقال پیدا می‌کند. از آنجاکه ساختار و تحریک مد TM هست، تنظیمات پورت‌ها روی مد TM قرار داده و طول موج را ۱ تا ۲ میکرومتر تغییر داده و نتایج را بررسی می‌کنیم.

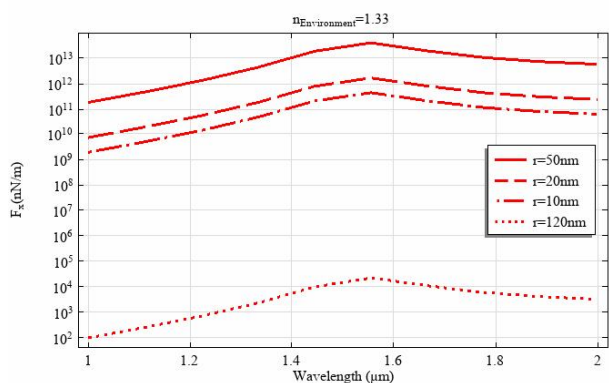
۵- نتایج

شکل (۳) توزیع میدان الکتریکی در موجبر را نشان می‌دهد. در مطالعه برای تعیین تأثیر ضریب شکست محیط‌های مختلف بر نیروی تله نوری، مقایسه‌ای بین نتایج شبیه‌سازی با ضرایب شکست ۱/۳۳ (آب)، ۱/۳۵، ۱/۳۷ و ۱/۳۹ با حالتی که ذره در خلاء (ضریب شکست ۱) قرار دارد انجام شد. مشاهده شد که نیروی تله در محیط‌هایی با ضریب شکست بالاتر به مراتب بیش‌تر از خلاء است و با افزایش ضریب شکست محیط، نیروی تله افزایش می‌یابد. نیروی بیش‌تری در جهت x برای ذرات بزرگ‌تر به‌دست آمد. ساختار پیشنهادی قادر است نیروی قابل ملاحظه‌ای بر ذرات ۱۰ نانومتری وارد کند، که این مرتبط با تشدید پلاسمون‌های

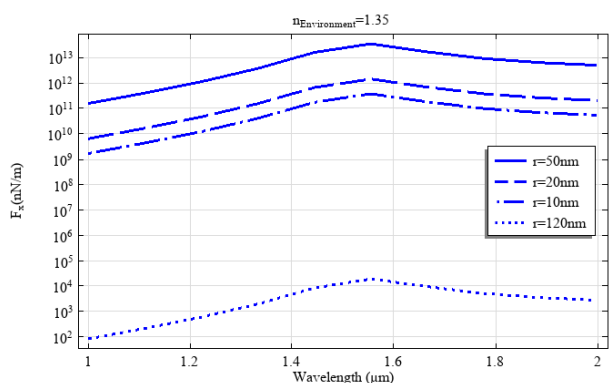


۶- نتیجه گیری

پلاریتون‌های پلاسمون سطحی برانگیخته شده از الکترون‌های سطحی در مرز بین فلز و دی‌الکتریک می‌باشند که به دلیل توانایی‌های مکانیکی در مقیاس‌های خیلی کوچک‌تر از طول موج‌های نور معمول، کاربردهای متعددی در نانو فوتونیک پیدا کرده‌اند. در این مقاله، کاربردهای مهم این پلاریتون‌ها در دام انداختن نوری نانو ذرات دی‌الکتریک به وسیله‌ی انبرک‌های نوری پلاسمونی بررسی می‌گردد. انبرک‌های نوری پلاسمونی قادر به ایجاد میدان‌های محلی قوی در نوک خود و افزایش میدان‌های نوری هستند، که این امکان را فراهم می‌کند تا ذرات بسیار ریزتر از حد پراش به دام بیفتند، این قابلیت را به یک گزینه مطلوب برای تولید انبرک‌های نوری پلاسمونی در نانو‌ها تبدیل می‌کند. انبرک‌های نوری پلاسمونی می‌توانند ذرات کوچک‌تری را نسبت به انبرک‌های نوری معمول دام کنند و دام‌اندازی در ابعاد زیر حد پراش را ممکن سازند.

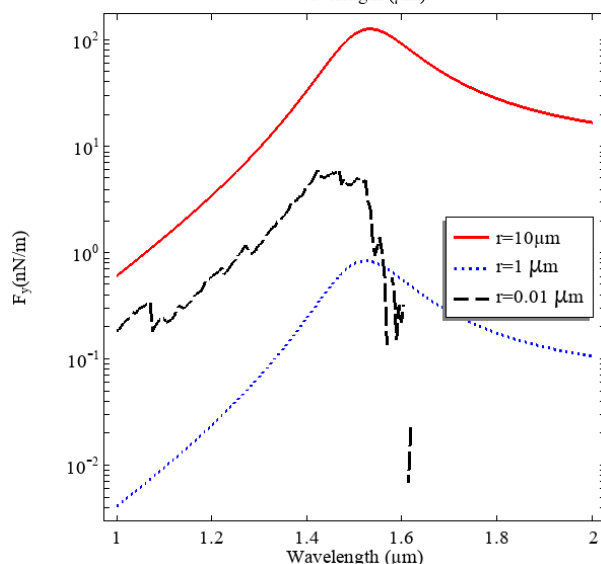
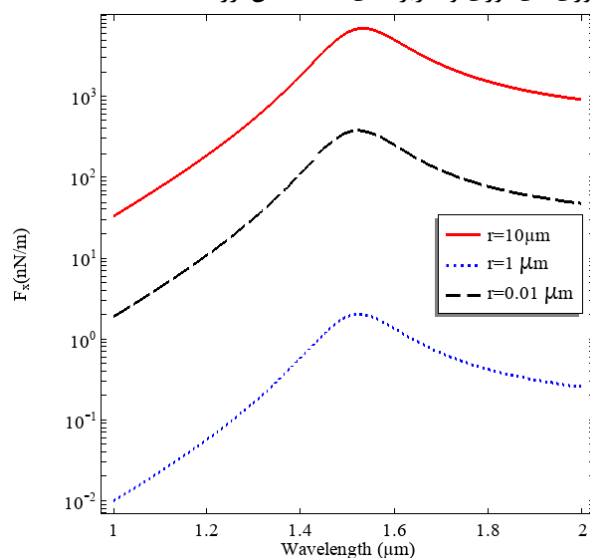


شکل (۵): تغییرات نیروهای تله انداز در یک محیط آبی (ضرب شکست ۱/۳۳) برحسب طول موج در راستای x به ازای شعاع‌های مختلف ذرات پلی‌استایرن و در طول موج ۱ تا ۲ میکرومتر.

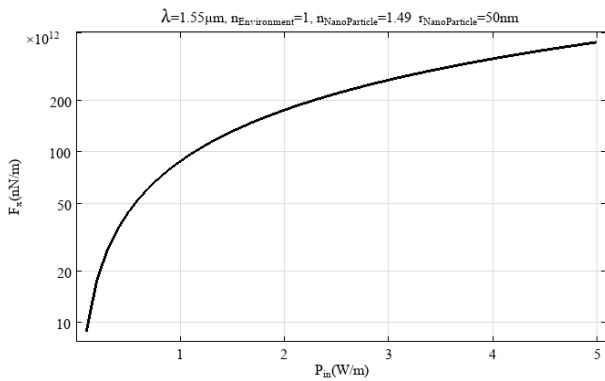


شکل (۶): تغییرات نیروهای تله‌انداز در یک محیط با ضریب شکست ۱/۳۵ برحسب طول موج در راستای x به ازای شعاع‌های مختلف ذرات پلی‌استایرن و در طول موج ۱ تا ۲ میکرومتر.

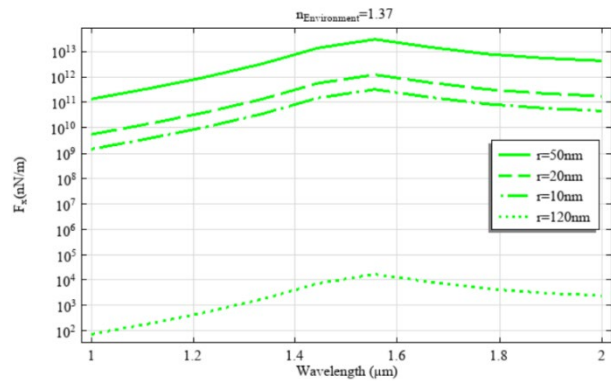
در نتیجه، مطالعات تأکید دارند که خصوصیات فیزیکی ذرات نقش مهمی در پدیده تله نوری این سیستم دارند و این اطلاعات به عنوان یک ابزار قدرتمند می‌توانند در بهبود عملکرد فناوری‌های مبتنی بر نور و کاربردهای مختلف آن مورد استفاده قرار گیرند. ساختار پیشنهادی در این تحقیق، توانسته است مقدار نیروی قابل قبولی را برای ذرات با اندازه ۱۰ نانومتر ایجاد کند. این امر به تشدید پلاسمون‌های سطحی مربوط است و نشان‌دهنده توانایی ساختار در تله نوری و دستکاری نانوذرات می‌باشد. به طور کلی، این تحقیق به روشنی اظهار می‌کند که تغییرات در خصوصیات ذرات و خصوصیات اپتیکی محیط، تأثیر مستقیمی بر نیروهای تله در سیستم انبرک پلاسمونیک دارد و این دانش، برای بهبود فناوری‌های نوری و کاربردهای مختلف آن ارزشمند است.



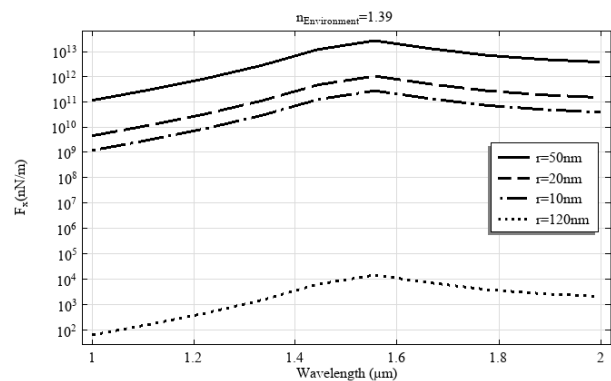
شکل (۴): نیروهای به دام‌اندازی پلی‌استایرن به وسیله انبرک مخروطی پلاسمونیک طراحی شده (الف) در راستای محوری (x) و (ب) در راستای عرضی (y).



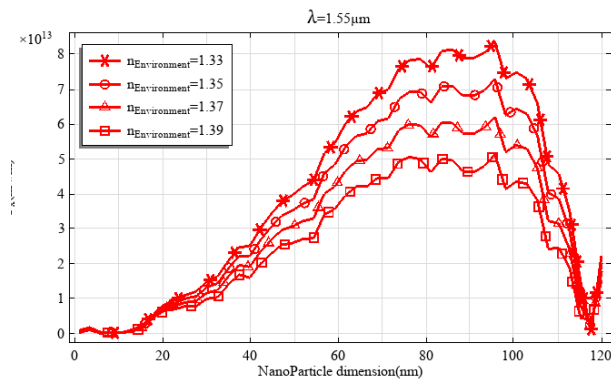
شکل (۶): تغییرات نیروهای تله‌انداز در محیط خلاء (ضریب شکست ۱) برای یک ذره پلی‌استایرن با شعاع ۵۰ نانومتر و ضریب شکست ۱/۴۹ و در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر در راستای x و در توان‌های کمتر از ۱ وات تا ۵ وات.



شکل (۷): تغییرات نیروهای تله‌انداز در یک محیط با ضریب شکست ۱/۳۷ برحسب طول موج در راستای x به ازای شعاع‌های مختلف ذرات پلی‌استایرن و در طول موج ۱ تا ۲ میکرومتر.



شکل (۸): تغییرات نیروهای تله‌انداز در یک محیط با ضریب شکست ۱/۳۹ برحسب طول موج در راستای x به ازای شعاع‌های مختلف ذرات پلی‌استایرن و در طول موج ۱ تا ۲ میکرومتر.



شکل (۹): تغییرات نیروهای تله‌انداز در محیط‌های با ضریب شکست ۱/۳۳ و ۱/۳۵ و ۱/۳۷ و ۱/۳۹ برحسب ابعاد ذرات پلی‌استایرن و در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر در راستای x به ازای شعاع‌های مختلف ذرات پلی‌استایرن.

مراجع:

- [1] K. L. Kelly, E. Coronado, L. L. Zhao, and G. C. Schatz, "The Optical Properties of Metal Nanoparticles: The Influence of Size, Shape, and Dielectric Environment," *ChemInform*, vol. 34, no. 16, Apr. 2003, doi: <https://doi.org/10.1002/chin.200316243>.
- [2] P. B. Johnson and R. W. Christy, "Optical Constants of the Noble Metals," *Physical Review B*, vol. 6, no. 12, pp. 4370–4379, Dec. 1972, doi: <https://doi.org/10.1103/physrevb.6.4370>.
- [3] P. K. Jain, X. Huang, I. H. El-Sayed, and M. A. El-Sayed, "Noble Metals on the Nanoscale: Optical and Photothermal Properties and Some Applications in Imaging, Sensing, Biology, and Medicine," *Accounts of Chemical Research*, vol. 41, no. 12, pp. 1578–1586, Dec. 2008, doi: <https://doi.org/10.1021/ar7002804>.
- [4] S. Link, Z. L. Wang, and M. A. El-Sayed, "Alloy Formation of Gold–Silver Nanoparticles and the Dependence of the Plasmon Absorption on Their Composition," *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 103, no. 18, pp. 3529–3533, May 1999, doi: <https://doi.org/10.1021/jp990387w>.
- [5] I. Freestone, N. Meeks, M. Sax, and C. Higgett, "The Lycurgus Cup — A Roman nanotechnology," *Gold Bulletin*, vol. 40, no. 4, pp. 270–277, Dec. 2007, doi: <https://doi.org/10.1007/bf03215599>.
- [6] Yun Seon Do, Jung Ho Park, Bo Yeon Hwang, Sung Min Lee, Byeong Kwon Ju, and Kyung Cheol Choi, "Plasmonic Color Filter and its Fabrication for Large-Area Applications," *Advanced optical materials*, vol. 1, no. 2, pp. 133–138, Feb. 2013, doi: <https://doi.org/10.1002/adom.201200021>.
- [7] S. Yokogawa, S. P. Burgos, and H. A. Atwater, "Plasmonic Color Filters for CMOS Image Sensor Applications," *Nano Letters*, vol. 12, no. 8, pp. 4349–4354, Jul. 2012, doi: <https://doi.org/10.1021/nl302110z>.
- [8] K. A. Willets and R. P. Van Duyne, "Localized Surface Plasmon Resonance Spectroscopy and Sensing," *Annual Review of Physical Chemistry*, vol. 58, no. 1, pp. 267–297, May 2007, doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.physchem.58.032806.104607>.
- [9] E. Hutter and J. H. Fendler, "Exploitation of Localized Surface Plasmon Resonance," *Advanced Materials*, vol. 16, no. 19, pp. 1685–1706, Oct. 2004, doi: <https://doi.org/10.1002/adma.200400271>.



- trapping: dynamics and protein-antibody co-trapping”, vol. 13, no. 13, Jun. 2013, doi: 10.1039/C3LC00003F.
- [26] A. A. Al, A. Zehtabi-Oskuie, and R. Gordon, “Observing single protein binding by optical transmission through a double nanohole aperture in a metal film,” *Biomedical Optics Express*, vol. 4, no. 9, pp. 1504–1504, Aug. 2013, doi: <https://doi.org/10.1364/boe.4.001504>.
- [27] A. Kotnala and R. Gordon, “Quantification of High-Efficiency Trapping of Nanoparticles in a Double Nanohole Optical Tweezer,” *Nano Letters*, vol. 14, no. 2, pp. 853–856, Jan. 2014, doi: <https://doi.org/10.1021/nl404233z>.
- [28] S. Wheaton, R. M. Gelfand, and R. Gordon, “Probing the Raman-active acoustic vibrations of nanoparticles with extraordinary spectral resolution,” *Nature Photonics*, vol. 9, no. 1, pp. 68–72, Nov. 2014, doi: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.283>.
- [29] R. Regmi, A. A. Al Balushi, H. Rigneault, R. Gordon, and J. Wenger, “Nanoscale volume confinement and fluorescence enhancement with double nanohole aperture,” *Scientific Reports*, vol. 5, no. 1, Oct. 2015, doi: <https://doi.org/10.1038/srep15852>.
- [30] S. Jones, A. A. Al, and R. Gordon, “Raman spectroscopy of single nanoparticles in a double-nanohole optical tweezer system,” *Journal of optics*, vol. 17, no. 10, pp. 102001–102001, Sep. 2015, doi: <https://doi.org/10.1088/2040-8978/17/10/102001>.
- [31] H. Xu, S. Jones, B.-C. Choi, and R. Gordon, “Characterization of Individual Magnetic Nanoparticles in Solution by Double Nanohole Optical Tweezers,” *Nano letters*, vol. 16, no. 4, pp. 2639–2643, Mar. 2016, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b00288>.
- [32] U. Fano, “The Theory of Anomalous Diffraction Gratings and of Quasi-Stationary Waves on Metallic Surfaces (Sommerfeld’s Waves),” *Journal of the Optical Society of America*, vol. 31, no. 3, p. 213, Mar. 1941, doi: <https://doi.org/10.1364/josa.31.000213>.
- [10] A. Ashkin, “Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure,” *Physical Review Letters*, vol. 24, no. 4, pp. 156–159, Jan. 1970, doi: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.24.156>.
- [11] A. Ashkin, J. M. Dzielicz, and T. Yamane, “Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams,” *Nature*, vol. 330, no. 6150, pp. 769–771, Dec. 1987, doi: <https://doi.org/10.1038/330769a0>.
- [12] A. Ashkin and J. Dzielicz, “Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria,” *Science*, vol. 235, no. 4795, pp. 1517–1520, Mar. 1987, doi: <https://doi.org/10.1126/science.3547653>.
- [13] S. B. Smith, Y. Cui, and C. Bustamante, “Overstretching B-DNA: The Elastic Response of Individual Double-Stranded and Single-Stranded DNA Molecules,” *Science*, vol. 271, no. 5250, pp. 795–799, Feb. 1996, doi: <https://doi.org/10.1126/science.271.5250.795>.
- [14] T. T. Perkins, “Optical traps for single molecule biophysics: a primer,” *Laser & Photonics Review*, vol. 3, no. 1–2, pp. 203–220, Feb. 2009, doi: <https://doi.org/10.1002/lpor.200810014>.
- [15] Veneranda Garcés-Chávez, Romain Quidant, P. J. Reece, Gonçal Badenes, L. Torner, and K. Dholakia, “Extended organization of colloidal microparticles by surface plasmon polariton excitation,” vol. 73, no. 8, Feb. 2006, doi: <https://doi.org/10.1103/physrevb.73.085417>.
- [16] M. Righini, A. S. Zelenina, C. Girard, and R. Quidant, “Parallel and selective trapping in a patterned plasmonic landscape,” *Nature Physics*, vol. 3, no. 7, pp. 477–480, May 2007, doi: <https://doi.org/10.1038/nphys624>.
- [17] M. Righini, G. Volpe, C. Girard, D. Petrov, and R. Quidant, “Surface Plasmon Optical Tweezers: Tunable Optical Manipulation in the Femtonewton Range,” *Physical Review Letters*, vol. 100, no. 18, May 2008, doi: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.100.186804>.
- [18] M. L. Juan, M. Righini, and R. Quidant, “Plasmon nano-optical tweezers,” *Nature Photonics*, vol. 5, no. 6, pp. 349–356, May 2011, doi: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2011.56>.
- [19] M. Righini, P. Ghenuche, S. Cherukulappurath, V. Myroshnychenko, F. J. García de Abajo, and R. Quidant, “Nano-optical Trapping of Rayleigh Particles and *Escherichia coli* Bacteria with Resonant Optical Antennas,” *Nano Letters*, vol. 9, no. 10, pp. 3387–3391, Jan. 2009, doi: <https://doi.org/10.1021/nl803677x>.
- [20] L. Huang, S. J. Maerkl, and O. J. F. Martin, “Integration of plasmonic trapping in a microfluidic environment,” *Optics Express*, vol. 17, no. 8, pp. 6018–6018, Mar. 2009, doi: <https://doi.org/10.1364/oe.17.006018>.
- [21] K. Wang, E. Schonbrun, and K. B. Crozier, “Propulsion of Gold Nanoparticles with Surface Plasmon Polaritons: Evidence of Enhanced Optical Force from Near-Field Coupling between Gold Particle and Gold Film,” *Nano Letters*, vol. 9, no. 7, pp. 2623–2629, Jun. 2009, doi: <https://doi.org/10.1021/nl900944y>.
- [22] Y. Pang and R. Gordon, “Optical Trapping of 12 nm Dielectric Spheres Using Double-Nanoholes in a Gold Film,” *Nano Letters*, vol. 11, no. 9, pp. 3763–3767, Aug. 2011, doi: <https://doi.org/10.1021/nl201807z>.
- [23] Y. Pang and R. Gordon, “Optical Trapping of a Single Protein,” *Nano Letters*, vol. 12, no. 1, pp. 402–406, Dec. 2011, doi: <https://doi.org/10.1021/nl203719v>.
- [24] A. Kotnala, D. DePaoli, and R. Gordon, “Sensing nanoparticles using a double nanohole optical trap,” *Lab on a Chip*, vol. 13, no. 20, p. 4142, 2013, doi: <https://doi.org/10.1039/c3lc50772f>.
- [25] A. Zehtabi-Oskuie, H. Jiang, B. R. Cyr, D. Rennehan, A. A. Al-Balushi and R. Gordon, “Double nanohole optical