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

افزایش جذب نوری با آرایه‌ای از نانوذرات بر بستر دی‌الکتریک-فلز در ناحیه مادون قرمز

مریم جمال زاده، علیرضا کشاورز

M.Jamalzadeh@sutech.ac.ir
Keshavarz@sutech.ac.ir

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، ایران

چکیده - امروزه نانوذرات فلزی به علت خواص نوری مطلوب، مورد توجه قرار گرفته‌اند و روش‌های متعددی برای ساخت و استفاده از آن‌ها در قطعات مختلف ابداع شده است. پلاسمون‌های سطحی نوسانات دسته جمعی الکترون در فلزات می‌باشند که می‌توانند با امواج الکترومغناطیسی تحریک شوند که به عنوان یک مؤلفه اصلی در مسیریابی و تعیین خواص نوری در مقیاس‌های نانومتر بشمار می‌روند. در این پژوهش، بررسی خواص نوری ساختار چندلایه‌ای متشکل از آرایه‌ای از نانوذرات است که بر روی یک بستر دی الکتریک قرار دارد و همچنین عوامل مؤثر بر افزایش جذب نوری می‌باشد. خواص نوری نانوذرات به جنس، شکل، اندازه و محیط دی-الکتریک بستگی دارند و عوامل مختلفی مانند قطرنانوذرات، زاویه تابش فرودی و فاصله بین نانوذرات بر بهبود جذب تأثیرگذار می-باشند که مورد بررسی قرار گرفته است.

کلید واژه-پلاسمونیک، جذب نوری، نانوذرات.

Increasing Optical Absorption With an Array of Nanoparticles on a Dielectric-Metal Substrate in The Infrared Region

Maryam Jamalzadeh, Alireza Keshavarz

M.Jamalzadeh@sutech.ac.ir
Keshavarz@sutech.ac.ir

Physics Department, Shiraz University of Technology, Iran

Nowadays, metal nanoparticles have been considered due to their desirable optical properties, and several methods have been developed for their fabrication and use in various devices. Surface plasmons are mass fluctuations of electrons in metals that can be excited by electromagnetic waves, which are a major component in routing and determining optical properties at the nanometer scale. In this study, the optical properties of a multilayer structure consisting of an array of nanoparticles located on a dielectric substrate are also factors affecting the increase of optical absorption. The optical properties of nanoparticles depend on the material, shape, size and dielectric environment, and various factors such as nanoparticle diameter, incident radiation angle and distance between nanoparticles affect the absorption improvement that has been investigated.

Keywords: Plasmonic, Optical absorbtion, Nanoparticles.

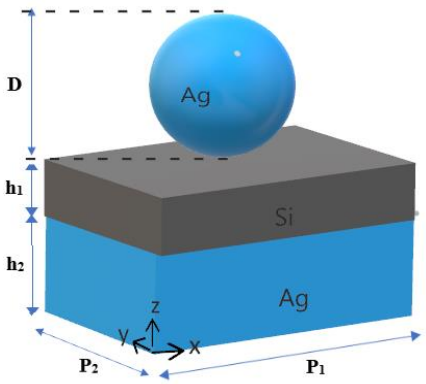
[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-25]

مقدمه

ساختارهای چندلایه، به دلیل کارآیی در کنترل خواص نوری و کاربردهای زیاد در ساخت ابزارهای الکترواپتیکی مورد توجه محققان قرار گرفته است. این ساختارها از لایه‌ها با ضخامت، مواد و اشکال مختلف تشکیل شده‌اند. در سالهای اخیر، ساختارهای فلز-دی‌الکتریک به دلیل خواص پلاسمونی، مورد علاقه پژوهشگران قرار گرفته است. پژوهش‌ها نشان می‌دهد موادی بر پایه‌ی نانوساختارهای فلزی پاسخی مناسب به بسیاری از نیازهای فناوری امروز و آینده را فراهم می‌کنند. این مواد دارای ویژگی‌هایی مانند تشدید پلاسمونی هستند[۱]. پلاسمون های سطحی(SP) نوسانات دسته جمعی الکترون در فلزات می‌باشند که می‌توانند با امواج الکترومغناطیسی تحریک شوند که به عنوان یک مؤلفه اصلی در مسیریابی و تعیین خواص نوری در مقیاس‌های نانومتر بشمار می‌روند. همچنین فلزات به دلیل جذب بالای نور، به عنوان جاذب نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. عوامل مختلفی مانند دما ، ضخامت، دوره، قطر، زاویه و پهنای باند برای تغییر در خواص نوری و بهبود جذب نوری موثر هستند. در سال ۲۰۰۸، لاندی و همکارانش روی سیستم جاذب کامل تحقیق کردند و جذب ۸۸ درصدی امواج الکترومغناطیسی با PMAs را نشان دادند که کاربردهای مختلفی از جمله حسگرهای لایه‌های نازک دارند. آکیموو وهمکارانش، نشان دادند با افزایش قطر ذره می‌توان شاهد جذب قوی در طول موجهای مختلف بود[۲]. به کمک تحقیقات انجام شده در طول دهه‌های گذشته، روند دستیابی به جذب نور بالا در فرامواد و نانوساختارهای پلاسمونی به شدت افزایش یافته است. علاوه بر این در سال ۲۰۱۶، محققان با استفاده از لایه نازک از طلا با اشکال مختلف یک حسگر جاذب در فرکانس مادون قرمز طراحی کردند که بازدهی جذب بین ۷۸ تا ۹۸ درصد از سیستم به ثبت رسید[۳].

همچنین مطالعات بر روی ساختارهای جاذب و ساختارهای چندلایه، به دلیل کارآیی در کنترل خواص نوری مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند.

جاذب ایده‌آل دارای نوار جذبی نزدیک به یک می‌باشد. مواد با جذب ایده‌آل در سلول‌های خورشیدی، حسگرها، عناصر اپتوالکترونیک، فیلترها، افزایش پراکندگی رامان، تصویربرداری‌های پزشکی و همچنین برای نامرئی‌سازی کاربرد دارند. در این مقاله به بررسی یک جاذب کامل متشکل از آرایه‌ای از نانوذرات نقره بر روی یک زیرلایه سیلیکون و بستر نقره پرداخته شده است. برای این موضوع از تشدید پلاسمون‌های نقره در اطراف نانو ذره استفاده شده است و با توجه به اینکه تشدید پلاسمون به اندازه ذره و محیط اطراف بستگی دارد، این عوامل نیز مورد بررسی قرار می‌گیرند و میزان جابجایی فرکانسی محاسبه می‌شود. دراین پژوهش، آرایه ای از نانوذرات نقره بر روی یک لایه سیلیکون و یک بستر نقره شبیه‌سازی می‌شود که به دلیل اینکه نانوذرات به صورت آرایه و تکراری می‌باشند، شکل۱ یک سلول واحد از آرایه را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل۱، مشاهده می‌گردد، قطر نانوذره(d)، پهنای لایه‌ی سیلیکون(H_1)، پهنای لایه‌ی نقره(H_2)، فاصله طول(P_1) و عرض (P_2) لایه زیرین و محورها مشخص شده‌اند.



شکل۱: طرح نمادین آرایه ای از یک نانوذره نقره بر روی یک لایه سیلیکون و بستر نقره.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-25]

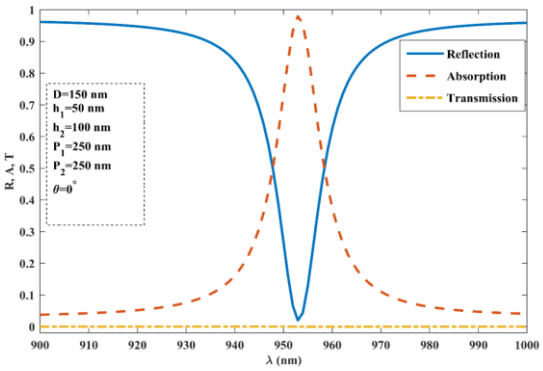
شبیه‌سازی

در این ساختار لایه زیرین نقره به عنوان بازتابنده نور استفاده می‌گردد. برای بررسی میزان عبور، بازتاب و جذب ساختار پیشنهادی، از نرم افزار شبیه‌سازی کامسول ماژول اپتیک موجی استفاده شده است. برای محاسبات میزان ضریب شکست نقره از داده‌های تجربی جانسون و کریستی استفاده می‌شود[۴]. به علاوه محاسبات برای یک سلول واحد انجام می‌شود، در راستای محور x و محور y از شرط مرزی دوره‌ای و بالا و پایین ساختار نیز از لایه PML استفاده می‌شود. به کمک معادله هلمهولتز زیر توزیع میدان در هر یک از لایه‌ها بررسی می‌شود:

$$\nabla \times \mu_r^{-1}(\nabla \times \mathbf{E}) - K_0^2\left(\varepsilon_r - \frac{i\sigma}{\omega\varepsilon_0}\right)\mathbf{E} = 0 \quad (1)$$

که ε_r، ε_0، μ_r^{-1}، σ و k_0^2 به ترتیب گذردهی نسبی، خلاء، نفوذپذیری نسبی، رسانندگی و عدد موج می‌باشند. سپس نتایج برای طول موج های مختلف محاسبه می‌گردد.

همانطور که گفته شد در این پژوهش عوامل موثر بر خواص نوری مانند ضریب شکست، قطرنانوذرات، فاصله بین نانوذرات و زاویه تابش فرودی بررسی شد. با تعیین پارامترهای مورد استفاده برای شبیه‌سازی این نانوساختار نیز به صورت $d = ۱۵۰nm$، $H_1 = ۵۰nm$ و $H_2 = ۱۰۰nm$ در شکل ۲ ضرایب عبور، بازتاب و جذب محاسبه شده‌اند. یک میدان موج تخت با قطبش TM و در راستای y تابانده شده است که نمودار آبی، بازتاب را نشان می‌دهد، نموداری که به صورت خط‌چین و به رنگ قرمز رسم شده است، جذب را نشان می‌دهد و نمودار نقطه خط که به رنگ زرد مشخص شده است، عبور را نشان می‌دهد که چون لایه ی زیرین نقره در نظر گرفته شده است و نقره جذب بالایی دارد هیچ عبوری در این ساختار نیست به این معنی که عبور برابر با صفر می‌باشد. و اگر لیزری با طول موج ۹۵۳ نانومتر به ساختار طراحی شده تابانده شود، جذب تقریبا یک می‌شود بنابراین ساختار در این طول موج به عنوان یک حسگر مورد استفاده قرار می‌گیرد.



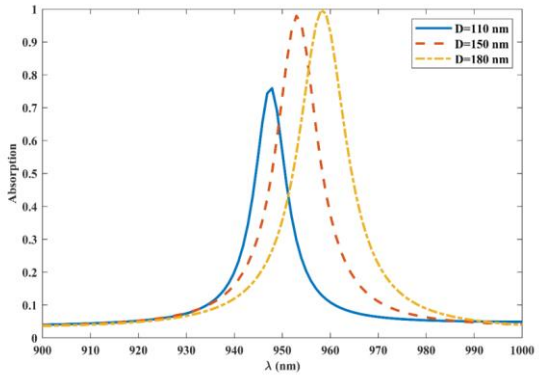
شکل۲: میزان بازتاب، جذب و عبور برای D=150 nm، $h_1 =$ 50nm، $h_2 = 100nm$، $p_1 = p_2 = 250nm$ و θ=0°. نمودار آبی بازتاب، نموداری که به صورت خط چین است، جذب و نموداری که به صورت نقطه خط می-باشد، عبور را نشان می‌دهد. در طول موج ۹۵۳ نانومتر جذب تقریبا یک شده است.

یکی از عوامل موثر بر جذب، تغییر قطر نانوذره می‌باشد که با کاهش قطر نانوذره، جذب کاهش پیدا می‌کند. همانطور که در شکل۳ نشان داده شده است، میزان قطر نانوذرات تغییر پیدا کرده است و ۱۱۰ ، ۱۵۰ و ۱۸۰ نانومتر در نظر گرفته شده است که باعث جابجایی قله‌ی جذبی متناسب با این تغییرات می‌باشد. در نتیجه می‌توان گفت که وقتی قطر نانوذره کم می‌شود، انرژی در ۹۵۳ نانومتر جابجا و حدود ۹۴۷ نانومتر می‌شود، این بدان معنی است که به دلیل کوچک شدن قطر، میدان افزایش پیدا کرده و جذب را تا حدود ۰.۷ یا ۰.۸ می‌رساند. وقتی قطر نانوذره زیاد می‌شود در حدود ۹۶۰ نانومتر، قله جذب وجود دارد. پس با تغییر قطر نانوذرات، قله جذب قابل کنترل است و می‌توان شاهد جابجایی در محل بیشینه‌ی جذبی بود که این امر در حسگرها بسیار کاربردی می‌باشد.

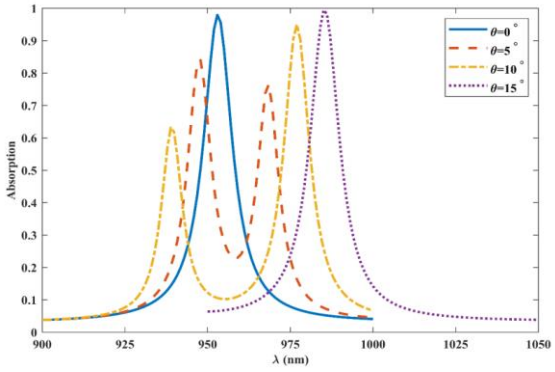
یکی دیگر از عوامل موثر بر جذب تغییر زاویه می‌باشد، با تغییر زاویه، قله بسیار تغییر می‌کند و کم و زیاد می‌شود، همانطور که در شکل۴، زاویه تغییر پیدا کرده است، در زاویه صفر درجه یک قله وجود دارد ولی اگر زاویه ۵ و ۱۰ درجه شود دو قله بوجود می‌آید و در زاویه ۱۵ درجه یک قله وجود دارد. وجود دو قله به این دلیل است که یک موج تابانده و یک موج بازتاب می‌شود، این دو موج باهم تداخل می‌کنند و باعث می‌شود جذب نزدیک به یک نباشد. تداخل برای ۵ درجه در طول موج ۹۳۰ نانومتر و

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-25]

۹۶۰ نانومتر تداخل سازنده و در ۹۵۳ نانومتر تداخل ویرانگر می‌باشد و باعث افت جذب می‌شود. بنابراین با تغییر زاویه می‌توان جذب را کنترل کرد.

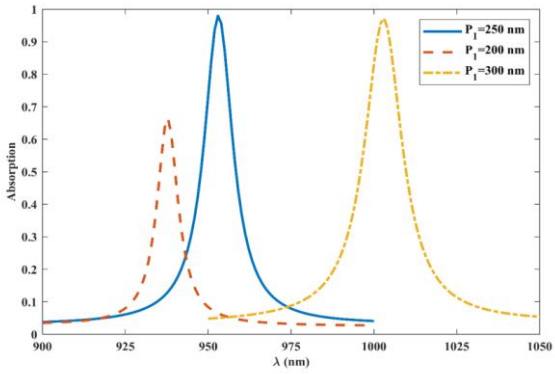


شکل۳: کنترل قله جذب با افزایش و کاهش قطر نانوذره را نشان می دهد. قطر نانوذره، ۱۱۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ نانومتر در نظر گرفته شده است که به ترتیب با خط آبی، خط چین قرمز و نقطه خط زرد رسم شده است.



شکل۴:کنترل جذب با تغییر زاویه را نشان می دهد. محل قله بسیار تغییر می کند، در زاویه صفر درجه یک قله وجود دارد، در زاویه ۵ و ۱۰ درجه دو قله و در زاویه ۱۵ درجه یک قله وجود دارد که به ترتیب با خط آبی، خط چین قرمز، نقطه خط زرد و نقاط بنفش رسم شده است.

با ایجاد تغییر در طول و عرض ساختار در شکل ۵ مشاهده می‌شود که جابجایی‌های زیادی بوجود می‌آیند. بنابراین با تغییر در فاصله بین نانوذرات هم می‌توان قله جذب را کنترل کرد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، P_1 و P_2 با اعداد ۲۵۰،۲۰۰ و ۳۰۰ نانومتر تغییر می‌کنند. دلیل تفاوت این دو باهم در این است که جهت y در نظر گرفته شده است و به این صورت است که یکی جابجایی بیشتر و یکی جابجایی کمتری دارد.



شکل۵: تغییر محل قله جذب با طول را نشان می دهد. 300 و 250، $p_1 = 200nm$ نانومتر در نظر گرفته شده است و قله جذب مربوط به هر کدام به ترتیب با خط چین قرمز، خط آبی و نقطه خط زرد رسم شده است.

نتیجه‌گیری

در ساختار طراحی شده می‌توان با تغییر قطر نانوذره، قله جذب را کنترل کرد و در قطر ۱۸۰ نانومتر تقریباً جذب ایده‌آلی داریم. یکی دیگر از عوامل مؤثر بر جذب تغییر زاویه می‌باشد، با تغییر زاویه، محل قله‌ی جذبی بسیار تغییر می‌کند که در زاویه ۰ و ۱۵ درجه بهترین جذب را داریم، بنابراین می‌توان قله جذب را کنترل کرد. همچنین با ایجاد تغییر در فاصله بین نانوذرات می‌توان مشاهده کرد که جابجایی موثری بوجود می‌آید و در طول ۳۰۰ نانومتر و عرض ۲۰۰ نانومتر دارای جذب ایده‌آلی هستیم.

مرجع‌ها

[1] S. Orfanidis, D. Ramaccia and A. Toscano, *Electromagnetic waves and antennas*, Department of Electrical & Computer Engineering, Piscataway, 2002.

[2] Y.A. Akimov, W.S. Koh and K. Ostrikov, “Enhancement of optical absorption in thin-film solar cells through the excitation of higher-order nanoparticle plasmon modes,” Optics Express, 17(12), pp 10195-10205, 2009.

[3] Y. Weisheng, W. Zhihong, Y. Yang, H. Jiagung, L. Jingqi, G. Zaibing, T. Hun and Zh. XiXiang “High performance infrared plasmonic metamaterial absorbers and their applications to thin-film sensing,” Plasmonics, 11, 1557-1563, 2016.

[4] P.B. Johnson and R.W. Christy “Optical constans of the noble metals,” Phys. Rev. B, 6(12), 03755, 1972.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-25]