بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

افزایش میدان الکتریکی به کمک آرایه‌ای زنجیره‌ای از نانوذرات پلاسمونی

صادق بهمنی، فرهاد آزادی نمین

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

Sadeq.Bahmani@aut.ac.ir, Namin_Farhad@aut.ac.ir

چکیده – یکی از روش‌های افزایش شدت میدان الکتریکی در ابعاد نانومتری، استفاده از آرایه‌هایی از نانوذرات پلاسمونی است. در این مقاله، به منظور افزایش شدت میدان الکتریکی، با استفاده از روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، ساختارهایی زنجیره‌ای شکل از نانوذرات را یافته‌ایم که افزایش میدانی تا ۳۰ برابر را نشان می‌دهند. با استفاده از این آرایه‌های زنجیره‌ای، ساختارهایی متناوب را با حساسیت پایین به قطبش میدان الکتریکی معرفی کردیم. این ساختارها، توانایی افزایش میدان در نقاط متعددی از صفحه را دارا هستند و می‌توان کل صفحه را با آن‌ها پوشاند.

کلید واژه- پلاسمونیک، نانوذرات پلاسمونی، افزایش میدان الکتریکی.

Electric Field Enhancement Using a Chain Array of Plasmonic Nanoparticles

Sadeq Bahmani, Farhad Azadi Namin

Electrical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Sadeq.Bahmani@aut.ac.ir, Namin_Farhad@aut.ac.ir

Abstract - One of the methods of electric field enhancement in nanometer scales is using the plasmonic nanoparticles arrays. In this paper, to enhance the electric field, using an optimization method based on the genetic algorithm, we found a chain-like structure of nanoparticles, which can increase the electric field intensity up to 30 times. Using these chain arrays, we introduce some periodic structures with low sensitivity to polarization of electric field. These structures are able to enhance the field in many points of the plane and can cover the whole plane.

Keywords: Plasmonics, Plasmonic Nanoparticles, Electric Field Enhancement.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-24]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

مقدمه

افزایش میدان الکتریکی در ابعاد نانومتری کاربردهای فراوانی در زمینه‌هایی مانند حسگرها، نانوآنتن‌ها [۱] و افزایش کارایی سلول‌های خورشیدی [۲] دارد. یکی از مهمترین روش‌های افزایش میدان الکتریکی، استفاده از نانوذرات پلاسمونی مانند نانوذرات طلا در فرکانس تشدید آن‌ها است که باعث تمرکز شدت میدان الکتریکی تابشی در اطراف نانوذره می‌شود[۳].

برای رسیدن به این منظور، آرایه‌های متناوب از نانوذرات [۳] یا ساختارهای غیرمتناوب [۴] متعددی پیشنهاد شده‌اند. استفاده از روش‌های مختلف بهینه‌سازی نظیر ازدحام ذرات [۵] یا الگوریتم ژنتیک [۶] نیز برای یافتن ساختارهای مناسب، مورد توجه بوده است. در این مقاله از الگوریتم ژنتیک برای یافتن ساختارهایی مناسب برای افزایش میدان بهره برده‌ایم.

در ادامه‌ی مقاله، ابتدا هندسه و مشخصات فیزیکی ساختار مورد مطالعه و روش بهینه‌سازی آن با الگوریتم ژنتیک معرفی شده‌اند. سپس نتایج بهینه‌سازی عنوان و مورد بحث واقع شده است. در انتها با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، ساختارهایی برای افزایش میدان در تمام صفحه، با حساسیت اندک به قطبش، معرفی شده‌اند.

روش و ساختار

یکی از مهم‌ترین ساختارهایی که در افزایش میدان به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است، نانودیمرهای پلاسمونی هستند [۷]. به یک جفت نانوذره که مجاور هم قرار گرفته باشند، نانودیمر می‌گویند. در این مقاله، ساختار مناسب را بر پایه یک نانودیمر توسعه داده‌ایم.

نانوذرات استفاده‌شده، کروی و از جنس طلا هستند. ضریب دی‌الکتریک طلا با استفاده از مقادیر تجربی جانسون-کریستی مدل شده است[۸]. قطر نانوکره‌ها ۱۳۵ نانومتر و محیط از جنس SiO_2 با ضریب دی‌الکتریک ۴۶/۱ در نظر گرفته شد. میدان الکتریکی تابشی را به صورت یک موج تخت با طول موج فضای آزاد ۷۵۲ (معادل ۵۱۱ نانومتر در SiO_2) و با شدت ۱ ولت بر متر درنظر گرفتیم. این طول موج، در واقع طول موج تشدید سطح مقطع پراکندگی نانوذره‌ای به قطر ۱۳۵ نانومتر است که در محیطی از جنس SiO_2 قرار گرفته است.

با توجه به ملاحظات ساخت، حداقل فاصله‌ی هر دو نانوذره ۲۵ نانومتر در نظر گرفته شد. گرچه کاهش فاصله نانوذرات موجب افزایش بیشتر میدان الکتریکی میان آن‌ها می‌شود، اما پیاده‌سازی را در عمل دشوارتر می‌سازد.

برای میدان الکتریکی پراکنده‌شده از آرایه‌ای از کره‌ها روابط تحلیلی براساس پراکندگی مای تعمیم‌یافته وجود دارند [۹]. برای این روابط، کد آماده‌ای نیز در دسترس است که در این مقاله شبیه‌سازی‌ها را به کمک آن انجام دادیم [۱۰]. با داشتن بیشنیه‌ی میدان الکتریکی در ساختار، آن را به روش الگوریتم ژنتیک با استفاده از بهینه‌ساز نرم‌افزار متلب بهینه کردیم.

برای یک نانودیمر، که از یک جفت نانوذره با مشخصات گفته‌شده تشکیل شده‌است، شدت میدان الکتریکی در طول موج انتخاب‌شده در اینجا، تا ۸ برابر افزایش می‌یابد.

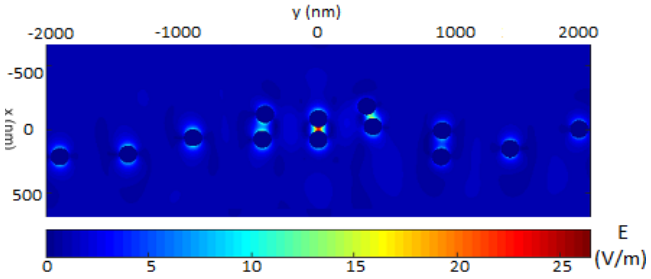
جهت افزایش شدت میدان الکتریکی در نانودیمر، نانوذرات دیگری، یک‌به‌یک، به ساختار اضافه شدند. در واقع بهینه‌سازی در چندین مرحله انجام شد و در هر مرحله فقط یک نانوذره به ساختار افزوده و موقعیتش به گونه‌ای تعیین گردید که شدت میدان الکتریکی در نانودیمر، به بیشترین مقدار ممکن برسد. این روند تا رسیدن تعداد نانوذرات به ۱۵ نانوذره ادامه یافت.

بحث و بررسی نتایج

با بهینه‌سازی موقعیت هر نانوذره افزوده‌شده به ساختار در هر مرحله، شدت میدان الکتریکی میان نانودیمر مرکزی افزایش یافت. برای مثال ساختار حاصل و توزیع میدان در آن برای ۱۳ نانوذره در شکل ۱ آمده است که افزایش شدت میدان الکتریکی را تا بیش از ۲۵ برابر نشان می‌دهد.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-24]

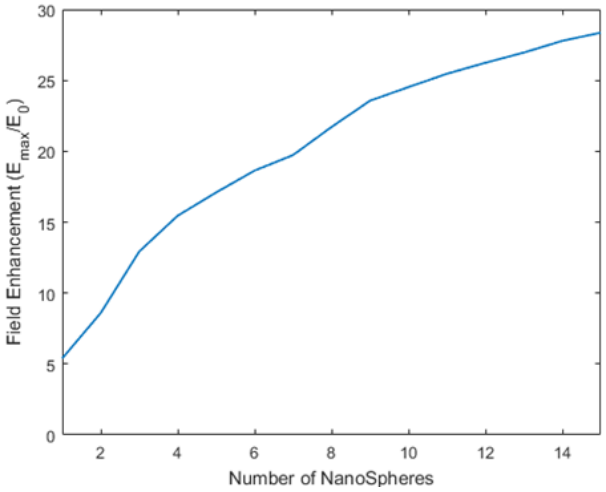


شکل ۱. توزیع شدت میدان الکتریکی پراکنده‌شده در ساختار بهینه‌شده برای ۱۳ نانوذره. میدان الکتریکی در نانودیمر تا ۲۵ برابر افزایش یافته است. قطبش در جهت x است.

در شبیه‌سازی‌ها، میدان عمود بر صفحه‌ی آرایه و قطبش در راستای محور نانودیمر فرض شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، موقعیت مناسب برای نانوذرات اضافه‌شده، روی عمودمنصف محور نانودیمر است. به‌علاوه، نانوذرات به صورت تکی یا به صورت دیمر در کنار هم روی این خط واقع شده‌اند. فاصله‌ی بهینه‌ی ذره یا دیمر مجاور نانودیمر مرکزی ۴۰۰ nm و فاصله سایر آن‌ها با یکدیگر ۵۰۰nm است که در حدود طول موج تابشی است. برای زنجیره‌ای از ۱۰ نانودیمر، طول و عرض ساختار ۰/۳ µm و ۴/۵ µm است. به این ترتیب می‌توان الگویی برای ساختار به‌دست‌آمده یافت. شکل ۲ این الگو را نمایش می‌دهد.

رابطه‌ی تعداد نانوذرات ساختار با حداکثر افزایش شدت میدان الکتریکی در نانودیمر مرکزی، با استفاده از الگوی به‌دست‌آمده، در شکل ۳ رسم شده است. چنان‌که از این شکل می‌توان دید، این رابطه، به صورت $|E| \propto \sqrt{N}$ است. بنابراین انرژی الکتریکی ذخیره‌شده در نانودیمر که با $|E|^2$ متناسب است رفتاری خطی پیدا می‌کند. به عبارت دیگر با افزودن هر نانوذره به ساختار، مقدار ثابتی به انرژی ذخیره‌شده در نانودیمر افزوده می‌شود.

در واقع بخشی از انرژی تابشی را نانوذره افزوده‌شده در خود ذخیره و بخشی از آن را پراکنده می‌سازد.

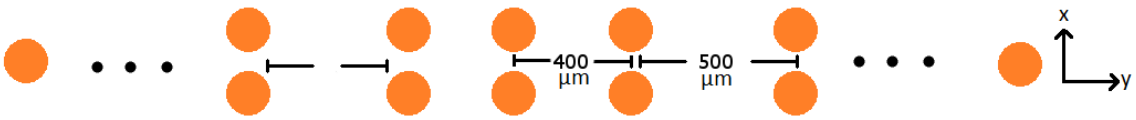


شکل ۳. نمودار بیشینه‌ی شدت میدان الکتریکی در ساختار و تعداد نانوذرات به کار رفته در آن.

اگر موقعیت نانوذره به درستی انتخاب شود، میدان پراکنده‌شده، می‌تواند به صورت همفاز با میدان درون نانودیمر جمع شود و به این ترتیب، شدت میدان را در دیمر افزایش دهد.

چون این ساختار براساس افزایش میدان در نانودیمر عمل می‌کند به قطبش موج تابشی حساس است و اگر قطبش موج عمود بر محور نانودیمر باشد، از شدت میدان الکتریکی در آن به شدت کاسته می‌شود. از سوی دیگر در برخی کاربردها، ساختارهایی که بتوانند افزایش میدان را در نقاط متعددی از صفحه ایجاد کنند، مطلوب هستند. برای رفع این مشکل، آرایه‌ی زنجیره‌ای شکل را در شبکه‌ای با تقارن چرخشی قرار دادیم. دو نمونه از این شبکه‌ها را در شکل ۴ رسم کرده‌ایم. با قرار دادن هر زنجیره روی یکی از اضلاع شبکه، آرایه‌ای تناوبی و متقارن حاصل می‌شود که می‌تواند در نقاط متعددی از صفحه شدت میدان الکتریکی را تا حدود ۲۰ برابر افزایش دهد (شکل ۵).

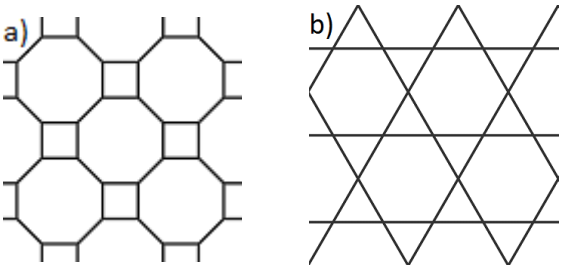
در این ساختارها، به علت تقارن چرخشی، همواره زنجیره‌ای از نانو ذرات وجود دارد که قطبش موج تابشی تا حد



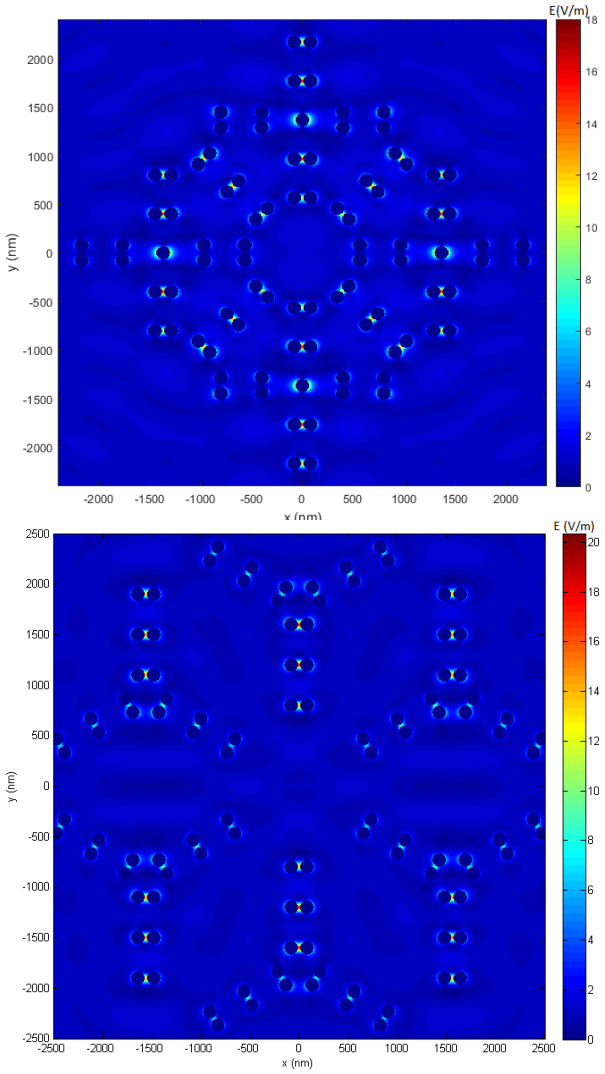
شکل ۲. الگوی به‌دست‌آمده برای چینش بهینه نانوذرات، به گونه‌ای شدت میدان الکتریکی در نانودیمر مرکزی بیشینه شود.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-24]



شکل۴. دو شبکه‌ی استفاده‌شده برای ایجاد ساختارهای متناوب و با تقارن چرخشی. a) تقارن ۹۰ درجه. b) تقارن ۶۰ درجه.



شکل ۵. توزیع شدت میدان الکتریکی در آرایه‌های پیشنهادی. بالا) آرایه‌ی حاصل از قرار دادن زنجیره‌های ۵ و ۶ تایی از نانوذرات روی اضلاع شبکه‌ی شکل a.۴. پایین) آرایه‌ی حاصل از قرار دادن زنجیره‌های ۶ تایی از نانوذرات روی اضلاع شبکه‌ی شکل b.۴.

خوبی در جهت محور نانودیمرهای آن باشد. بنابراین حساسیت آن‌ها به قطبش کاهش می‌یابد. ابعاد ساختارهای شکل ۵ حدود μm^2 ۰/۵×۰/۵ است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله با بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک، چینشی برای نانوذرات طلا یافتیم که با داشتن ۱۵ نانوذره، می‌تواند شدت میدان الکتریکی را تا ۳۰ برابر در یک نانودیمر افزایش دهد. از چنین ساختاری در کاربردهای حسگری یا به عنوان یک نانوآنتن در کاربردهای مختلف فوتونیک می‌توان استفاده نمود. همچنین نشان دادیم این ساختارها را می‌توان به عنوان جزء سازنده‌ی آرایه‌هایی که یک صفحه را بپوشانند و شدت میدان را در نقاط متعددی افزایش دهند، استفاده کرد.

مرجع‌ها

[1] Z. Liu, A. Boltasseva, R. H. Pedersen, R. Bakker, A. V. Kildishev, V. P.Drachev, V. M. Shalaev, “Plasmonic nanoantenna arrays for the visible,” Metamaterials, Vol. 2, pp. 45-51, 2008.

[2] S.Pillai, M.A.Green, “Plasmonics for photovoltaic applications,” Sol. Energy Mater Sol. Cells, Vol. 94, pp. 1481-1486, 2010.

[3] D. A. Genov, A. K. Sarychev, V. M. Shalaev and A. Wei, “Resonant Field Enhancements from Metal Nanoparticle Arrays”, Nano Lett., Vol. 4, pp. 153–158, 2004.

[4] F. A. Namin, Y. A. Yuwen, L. Liu, A. H. Panaretos, D. H. Werner and T. S. Mayer, “Efficient design, accurate fabrication and effective characterization of plasmonic quasicrystalline arrays of nano-spherical particles”, Sci. Rep., Vol. 6, 22009, 2016.

[5] C. Forestiere, M. Donelli, G. F. Walsh, E. Zeni, G. Miano and L. Dal Negro, “Particle-swarm optimization of broadband nanoplasmonic arrays”, Opt. Lett., Vol. 35 (2), pp. 133-135, 2010.

[6] C. Forestiere, A. J. Pasquale, A. Capretti, G. Miano, A. Tamburrino, S. Y. Lee, B. M. Reinhard, and Luca Dal Negro, “Genetically Engineered Plasmonic Nanoarrays”, Nano Lett., 12 (4), pp 2037–2044, 2012.

[7] A. Alù and N. Engheta, “Hertzian plasmonic nanodimer as an efficient optical nanoantenna,” Phys. Rev. B, Vol 78, pp. 195111, 2008.

[8] P. B. Johnson and R. W. Christy, “Optical Constants of the Noble Metals,” Phys. Rev. B, Vol. 6, pp. 4370, 1972.

[9] Y. L. Xu, “Electromagnetic scattering by an aggregate of spheres”, Appl. Opt, Vol. 34 (21), pp. 4573-4588, 1995.

[10] M. Ringler, “Plasmonische Nahfeldresonatoren aus zwei biokonjugierten Goldnanopartikeln,” Ph.D. dissertation, Dept. Physics, LMU Munich, 2008.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-24]