افزایش پهنای پرتو نصف توان نانوآنتن شیپوری پلاسمونیک به کمک دیواره‌های موج نشتی

معصومه شریفی، نجمه نزهت و احسان زارعیان جهرمی

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده – آنتن‌های شیپوری به دلیل بازشدگی تدریجی دهانه، تطبیق مناسبی بین امپدانس‌های موجبر و فضای آزاد ایجاد می‌کنند و ضریب بازتاب (S_{11}) مطلوبی را بدست می‌دهند. در این مقاله، ساختار جدیدی بر پایه آنتن شیپوری و با هدف افزایش پهنای پرتو نصف توان[1] در ناحیه فروسرخ نزدیک و در طول موج ۱۵۵۰nm ارائه شده است. در ساختار نانوآنتن شیپوری پلاسمونیک پیشنهاد شده، علاوه بر استفاده از بازشدگی تدریجی دهانه در نانوآنتن شیپوری برای رسیدن به S_{11} مطلوب، ساختار موج نشتی ایجاد شده در دیواره‌های آن نیز برای افزایش HPBW استفاده شده است. مزیت دیگر این ساختار کاهش تلفات جذب بدلیل کاهش میزان فلز بکار رفته در نانوآنتن است. این نانوآنتن در ساختارهایی مانند فوتوولتائیک و سلول‌های خورشیدی کاربرد دارد.

کلید واژه- آنتن شیپوری، پهنای پرتو نصف توان، پلاسمونیک، ضریب بازتاب.

Improving Half-Power Beamwidth of a Plasmonic Horn Nanoantenna Utilizing Leaky-Wave Walls

Masoomeh Sharifi, Najmeh Nozhat, Ehsan Zareian Jahromi

Faculty of Electrical Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

Abstract- Horn antennas provide proper impedance matching between the waveguide and free-space, because of the gradual increase in the physical aperture and hence, a suitable reflection coefficient (S_{11}) is obtained. In this paper, a new structure based on the horn antenna at the wavelength of 1550nm has been proposed and investigated to increase the half-power beamwidth (HPBW). In our proposed plasmonic horn nanoantenna, we have used the leaky wave structure in the horn walls to increase the HPBW. Moreover, the magnitude of S_{11} parameter is improved due to the gradual increase of aperture dimension. The loss of this nanoantenna has been reduced due to lower metal usage in the structure. The plasmonic horn nanoantenna can be used in some applications such as photovoltaic and solar cells.

Keywords: Horn antenna, Half-power beamwidth (HPBW), Plasmonic, Reflection coefficient (S_{11}).

[1] Half-Power Beamwidth (HPBW)

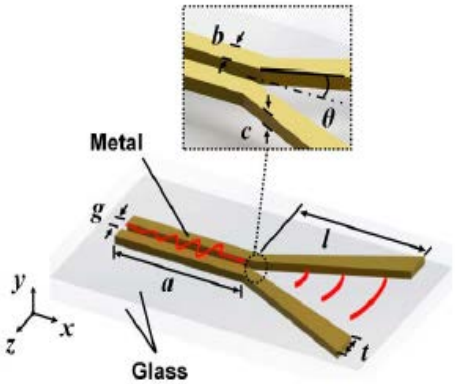
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت **www.opsi.ir** قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

آنتن‌ها در بازه وسیعی از طیف امواج الکترومغناطیسی برای انتقال بهینه انرژی به فضای آزاد مانند تلویزیون، رادیو، تلفن همراه، رادار و دیگر کاربردها استفاده می‌شوند. با توسعه اصول اساسی عملکرد آنتن‌های مایکروویو، در فرکانس‌های بالاتر می‌توان نانوآنتن‌های فلزی را برای ارسال و دریافت امواج نوری بکار برد. از آنتن‌های پلاسمونیک در کاربردهای مختلفی از جمله طیف‌سنج میدان نزدیک [۱]، فوتوولتائیک [۲]، آشکارساز نور [۳]، انتشار نور [۴ و ۵]، حسگری [۶]، نور غیرخطی [۷] و ارتباطات بی‌سیم [۸-۱۰] استفاده می‌شود. آنتن‌های تک-قطبی، دوقطبی، پاپیونی و یاگی‌یودا به تقلید از آنتن‌های مایکروویوی در بازه‌ی فرکانسی نوری تحلیل و بررسی شده‌اند [۱۱ و ۱۲]. با وجود کاربرد بسیار زیاد آنتن شیپوری در حوزه‌ی مایکروویو، این آنتن در حوزه‌ی نوری کمتر مورد توجه قرار گرفته است. افزایش تدریجی دهانه-ی آنتن شیپوری باعث افزایش تطبیق امپدانس موجبر و فضای آزاد می‌شود و افزایش جهت‌دهی[1] را به همراه دارد. در این مقاله ساختار جدیدی از یک نانوآنتن شیپوری پلاسمونیک پیشنهاد شده است که نسبت به ساختارهای مشابه دارای پهنای پرتو نصف توان بیشتر و توان بازگشتی کمتری در طول‌موج ۱۵۵۰nm است.

۲- هندسه ساختار و نتایج شبیه‌سازی

در سال‌های اخیر بیشتر تحقیق‌ها در مورد نانوآنتن‌ها مربوط به حل مسئله ساخت و پیشنهاد طرح‌هایی برای تطبیق هرچه بهتر امپدانس، بازده بالاتر و افزایش پهنای باند است. درمیان انواع آنتن‌ها، افزایش تدریجی دهانه‌ی آنتن شیپوری، میدان با فاز یکنواختی را به‌وجود می‌آورد که باعث افزایش جهت‌دهی و همچنین تطبیق امپدانس موجبر و فضای آزاد می‌شود. مزیت اصلی آنتن شیپوری نوری، مشابه همتای مایکروویوی آن، تطبیق خط انتقال و المان تشعشعی است که باعث کاهش ناپیوستگی نامطلوب و تلفات پراکندگی می‌شود. در شکل ۱ شماتیک نانوآنتن شیپوری بخشی[2] نشان داده شده است که دهانه‌ی نانوآنتن در جهت z یا میدان الکتریکی آن باز شده و به یک خط انتقال نوری از جنس نقره تزویج شده است. کل ساختار آنتن از جنس نقره است که در بستری از شیشه با ضریب شکست n=1.44 جاسازی شده است. ثابت دی-الکتریک فلز نقره بر اساس آزمایشات تجربی جانسون و کریستی برابر $\varepsilon = -132.8 + j3.32$ انتخاب شده است [۱۳].



شکل۱: شماتیک نانوآنتن شیپوری بخشی [۱۲].

این ساختار در نرم‌افزار CST در ناحیه‌ی فروسرخ نزدیک و در طول‌موج ۱۵۵۰nm شبیه‌سازی شده است. یکی از پارامترهای مهم در طراحی آنتن‌ها، ضریب بازتاب است که با S_{11} نشان داده می‌شود و میزان توان بازتاب شده از آنتن را نشان می‌دهد. توان برگشت داده شده، یا توسط بدنه‌ی آنتن جذب و باعث ایجاد تلفات می‌شود و یا تابش می‌شود. به‌همین دلیل سعی بر این است که میزان توان بازگشتی از آنتن کاهش داده شود. در بسیاری از کاربردها نیازمند پوشش بخش زیادی از نیم فضا هستیم. اگر چه ساختار آنتن شیپوری ضریب بازتاب مطلوبی را بدست می‌دهد، ولی HPBW کمی دارد. همچنین با توجه به اینکه فلزات در طیف نوری رسانای کاملی نیستند و از امواج پلاریتون پلاسمون سطحی[3] حمایت می‌کنند، در این بازه فرکانسی تلفات فلزات نیز زیاد است. در این مقاله به دلیل کاهش فلز مورد استفاده در ساختار جدید، تلفات آن نیز کاهش یافته است [۱۲]. ساختار جدید پیشنهاد شده در شکل ۲ ضمن استفاده از ویژگی بازشدگی تدریجی دهانه، دارای HPBW بالایی است و می‌تواند بخش بیشتری از نیم فضای روبه‌روی خودش را بپوشاند. طراحی مناسب ساختار معرفی شده به‌گونه‌ای است که مقدار پارامتر S_{11} آن نیز نسبت به آنتن معرفی شده در

[1] Directivity

[2] Sectoral Horn Nanoantenna

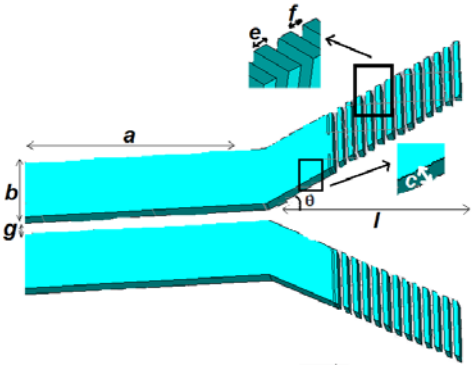
[3] Surface Plasmon Polariton: SPP

[۱۲] بهبود یافته است و در نتیجه توان بازگشتی کمتری دارد. این آنتن، از ناپیوسته‌کردن فلز دهانه‌ی نانوآنتن شیپوری بخشی، بدست آمده است. در واقع این نانوآنتن پیشنهادی ترکیب آنتن شیپوری و موج سیار است. از مزایای آنتن موج سیار، پهنای باند بالای آن است. ابعاد شکاف‌های دیواره جانبی و فاصله‌ی بین آن‌ها که به‌ترتیب پارامتر تشعشعی هر المان و آرایه را تغییر می‌دهد، طوری انتخاب شده است که S_{11} را هم بهبود ببخشد. هر یک از شکاف‌های ایجاد شده در آنتن شیپوری مانند آنتن دهانه-ای عمل می‌کند. میدان در هر شکاف به دلیل کوچک ابعاد آن، تقریبا هم‌دامنه و هم‌فاز است. میدان تشعشعی در فاصله‌ی دور هر شکاف از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۴]:

$$\mathbf{H}^{ff} = -j\,\omega \mathbf{F}_t \qquad (۱)$$

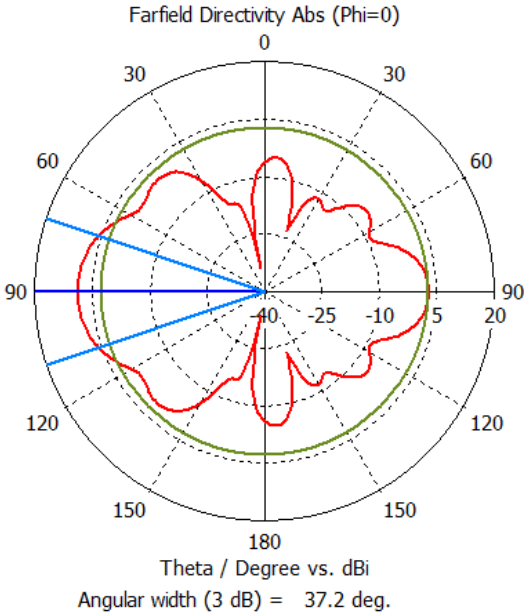
$$\mathbf{F}_t = \frac{\varepsilon}{4\pi}\iiint \frac{2\mathbf{E}\times\hat{n}}{R} e^{-jkR} dv \qquad (۲)$$

که در آن ω، ε، R و $\hat{n}$ به‌ترتیب فرکانس زاویه‌ای، ضریب گذردهی الکتریکی، فاصله نقطه مشاهده از شکاف و بردار واحد عمود بر شکاف است. $\mathbf{H}_{ff}$ میدان مغناطیسی راه دور در نقطه مشاهده، $\mathbf{E}$ میدان در شکاف، و $k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}$ است. پایین‌نویس t نیز بیانگر مولفه‌های عرضی است. از طرفی به دلیل برابر بودن اختلاف راه شکاف‌ها و اختلاف فاز تحریک آن‌ها، مجموعه شکاف‌ها مانند یک آرایه سرتاب[1] یکنواخت عمل می‌کند که بیشترین تشعشع آن در راستای زاویه بازشدگی آنتن شیپوری (θ) است. ترکیب آرایه سرتاب با روزنه‌های پهلوتاب، الگوی تشعشعی با بیشینه تشعشع در راستایی بزرگتر از θ را بدست می دهد. طول هر یک از دندانه‌های فلزی اضافه شده (e) و فاصله‌ی بین آن‌ها (f) برابر با ۱۰ نانومتر است. پارامترهای هندسی نانوآنتن به‌ترتیب برابر با a=1000 nm، b=100 nm، c=50 nm و g=30 nm است. زاویه بازشدگی (θ)، طول (l) و ضخامت فلز (t) در دهانه نانوآنتن نیز به‌ترتیب برابر با ۲۶/۶°، ۱۰۰۰ و ۱۰۰ نانومتر است. نمودار الگوی تشعشعی نانوآنتن شیپوری بخشی تحلیل شده در [۱۲] و نانوآنتن شیپوری پلاسمونیک پیشنهادی جدید در شکل‌های ۳ و ۴ رسم شده است.



شکل ۲: ساختار نانوآنتن شیپوری پلاسمونیک پیشنهادی برای رسیدن به HPBW بیشتر.

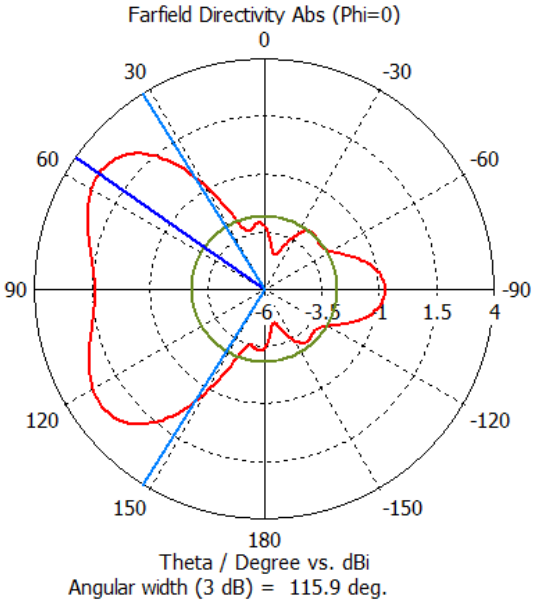
همان‌طور که دیده می‌شود، عرض پرتو نصف توان نانوآنتن شیپوری بخشی و ساختار پیشنهادی جدید به ترتیب برابر با ۳۷/۲° و ۱۱۵/۹° است که نشان‌دهنده افزایش بیش از سه برابری HPBW آنتن پیشنهادی نسبت به آنتن معرفی شده در [۱۲] است.



شکل ۳: نمودار الگوی تشعشعی نانوآنتن شیپوری بخشی مرجع [۱۲] با HPBW برابر با ۳۷/۲°.

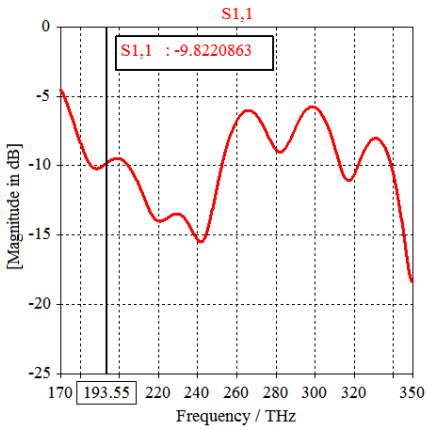
طبق اصل تقارن لورنتس، الگوی تشعشعی در گیرندگی و فرستندگی یکسان است. در واقع بررسی HPBW در حالت گیرندگی هم می‌تواند باشد. در نتیجه HPBW خوب این آنتن باعث می‌شود که بتواند انتخاب مناسبی در کاربردهایی چون سلول‌های خورشیدی و فوتوولتائیک باشد.

[1] End-fire



شکل ۴: نمودار الگوی شعشعی نانوآنتن شیپوری پلاسمونیک جدید با HPBW برابر با °۱۱۵/۹.

نمودار ضریب بازتاب (S_{11}) نانوآنتن پیشنهادی نیز در شکل ۵ نشان شده است، که بیانگر مقدار ۹/۸dB- در فرکانس کاری ۱۹۳/۵۵THz است. مقایسه نتایج بدست آمده با ساختار معرفی شده در [۱۲]، نشان می‌دهد که مقدار S_{11} به میزان بیش از ۳dB کاهش یافته است.



شکل ۵: نمودار ضریب بازتاب نانوآنتن پیشنهادی نشان داده شده در شکل ۲.

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله ساختار جدیدی از یک نانوآنتن شیپوری ترکیب شده با دیواره‌های جانبی موج نشتی به منظور افزایش HPBW، ارائه شده است. همان‌گونه که از نتایج شبیه‌سازی در طول موج ۱۵۵۰nm مشخص است، HPBW در نانوآنتن شیپوری پیشنهاد شده برابر °۱۱۵/۹ است که نسبت به ساختارهای مشابه بیش از سه برابر شده است. علاوه براین، کاهش میزان فلز استفاده شده در آنتن شیپوری بخشی، کاهش تلفات جذب را در پی داشته است. همچنین پارامتر مهم ضریب بازتاب (S_{11}) در نانوآنتن پیشنهادی به میزان بیش از ۳dB- بهبود داشته است. از این نانوآنتن در سلول‌های خورشیدی و فوتوولتائیک استفاده می‌شود.

مراجع

[1] P. Bharadwaj, R. Beams, and L. Novotny, “Nanoscale spectroscopy with optical antennas”, Chem. Eng. Sci., vol. 2, no. 136, pp. 150-160, 2011.

[2] H. A. Atwater and A. Polman, “Plasmonics for improved photovoltaic devices”, Nat. Mater., vol. 9, no. 3, pp. 203-205, 2010.

[3] M. W. Knight, H. Sobhani, P. Nordlander, and N. J. Halas, “Photodetection with active optical antennas”, Science, vol. 332, no. 6030, pp. 702-704, 2011.

[4] A. G. Curto, G. Volpe, T. H. Taminiau, M. P. Kreuzer, R. Quidant, and N. F. van Hulst, “Unidirectional emission of a quantum dot coupled to a nanoantenna”, Science, vol. 329, no. 5994, pp. 930-933, 2010.

[5] K. G. Lee, X. W. Chen, H. Eghlidi, P. Kukura, R. Lettow, A. Renn, and V. S. S. Götzinger, “A planar dielectric antenna for directional single-photon emission and near-unity collection efficiency”, Nat. Photonics, vol. 5, no. 3, pp. 166-169, 2011.

[6] J. N. Anker, W. P. Hall, O. Lyandres, N. C. Shah, J. Zhao, and R. P. Van Duyne, “Biosensing with plasmonic nanosensors”, Nat. Mater., vol. 7, no. 6, pp. 442-453, 2008.

[7] M. Kauranen and A. V. Zayats, “Nonlinear plasmonics”, Nat. Photonics, vol. 6, no. 11, pp. 737-748, 2012.

[8] J. S. Huang, T. Feichtner, P. Biagioni, and B. Hecht, “Impedance matching and emission emission properties of nanoantennas in an optical nanocircuit”, Nano. Lett., vol. 9, no. 5, pp. 1897-1902, 2009.

[9] A. Alù and N. Engheta, “Wireless at the nanoscale: optical interconnects using matched nanoantennas”, Phys. Rev. Lett., vol. 104, no. 21, pp. 213-902, 2010.

[10] D. M. Solís, J. M. Taboada, F. Obelleiro, and L. Landesa, , “Optimization of an optical wireless nanolink using directive nanoantennas”, Opt. Express, vol. 21, no. 2, pp. 2369-2377, 2013.

[11] L. Novotny and N. F. van Hulst, “Antennas for light”, Nat. Photonics, vol. 5, no. 2, pp. 83-90, 2011.

[12] Y. Yang, D. Zhao, H. Gong, et al, “Plasmonic sectoral horn nanoantennas,” Optics Lett., vol. 39, no. 11, pp. 3204-3207, 2014.

[13] P. B. Johnson and R. W. Christy, “Optical constants of the noble metals”, Phys. Rev., vol. 6, no. 12, pp. 4370-4379, 1972.

C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*, 3rd Ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005.