

بررسی نانوجت‌های فوتونی دوتایی تولید شده بر پایه پراش میدان نزدیک از مناطق فرنل دوکانونی

جعفر مصطفوی امجد*

گروه فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان

پست الکترونیکی: mostafavi@iasbs.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۴/۰۴/۲۰)

چکیده:

این مقاله به بررسی نانوجت‌های فوتونی (PNJs) تشکیل شده از ساختارهای حلقوی با توزیع هندسی فرنل گونه با بهره‌گیری از روش تقریب دوقطبی گسسته کاهش یافته (RDDA) پرداخته است. سه ساختار با توزیع هندسی حلقه‌های منظم، حلقه‌های منطبق بر مناطق فرنل و مناطق فرنل دوکانونی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. تشکیل و بهینه‌سازی دو نانوجت فوتونی (PNJهای دوتایی) در راستای محور انتشار، با تقسیم مناطق فرنل به دو منطقه و همچنین با تنظیم فاصله کانونی متوسط و شعاع قرص که منجر به تغییر در تعداد مناطق فرنل اصلی در هر منطقه تقسیم می‌شود، امکان‌پذیر است. بهترین PNJهای دوتایی جایگزیده و مجزا در ساختارهای معرفی شده شناسایی و برای چندین حالت مختلف بهینه‌سازی شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: نانوجت فوتونی، روش تقریب دوقطبی گسسته کاهش یافته، مناطق فرنل دوکانونی

گزارش شد [۱ و ۲]. تولید نانوجت‌های فوتونی یک اثر

۱. مقدمه

میدان فوتونی کاربردهای متعددی در زمینه‌های مختلف پیدا کرده الکترومغناطیسی محدود غیر تشدید است و نشان داده شده است که به شکل و ضریب شکست ریز ذرات حساس است [۳-۷]. با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد، نانوجت‌های است، که می‌توان به نانولیتوگرافی^۱ [۸-۱۰]، تصویربرداری ابر دقیق^۲ [۱۱ و ۱۲] و میکروسکوپی کاهش فلورسانس دو فوتونی^۳ [۱۳] اشاره کرد. روش‌های مختلفی برای دستکاری اندازه‌های عرضی و طولی نانوجت‌های

تولید و دستکاری نانوجت فوتونی (PNJ)^۱ و ویژگی‌های خاص آن‌ها موضوع اصلی در علم نانو تکنولوژی بوده است. نانوجت فوتونی یک میدان الکترومغناطیسی محدود شده در فضا است که با شدت بالا، واگرایی طولی کم و پهنای عرضی زیرطول موج مشخص می‌شود، که برای اولین بار در سال ۲۰۰۴ برای پراکندگی یک موج تخت توسط ذرات میکرواستوانه‌ها و میکروکره‌های دی‌الکتریک بدون اتلاف

۱. Photonic Nanojet

۲. Nanolithography

۳. Super-resolution Imaging

۴. Two-photon Fluorescence Depletion Microscopy

فوتونی و شدت قله آن‌ها پیشنهاد شده است. این نتایج نشان می‌دهد که اندازه‌های عرضی و طولی نانوجت‌های فوتونی به اندازه و شکل ریز ذرات، ضریب شکست میکروذرات و محیط اطراف، طول موج، قطبش و مشخصات پرتو فرودی بستگی دارد [۱۴-۱۷]. خواص نوری PNJها مانند اندازه، شکل، شدت و واگرایی نقش مهمی در بهبود عملکرد آنها دارد. چندین روش برای بهبود عملکرد PNJها گزارش شده است، مانند میکروکره‌های با ضریب شکست درجه‌بندی شده [۱۸]، میکروکره‌های پوسته-هسته [۱۹ و ۲۰]، میکروکره‌های بریده شده [۲۱ و ۲۲]، میکروکره‌ها با نمایه ضریب شکست هلالی شکل [۲۳]، آرایه‌ای از میکروکره‌ها [۲۴] و تقویت انتقال با تبدیل امواج ناپایا به امواج منتشرشونده [۲۵].

روش‌های شبیه‌سازی متعددی برای محاسبه انتشار امواج الکترومغناطیسی در محیط دی‌الکتریک معرفی شده است. شناخته شده‌ترین روش‌ها شامل شبیه‌سازی بر پایه نظریه مای و بسط سری دبی، روش اجزای محدود (FEM)، روش تفاضل محدود در حوزه زمان (FDTD)، روش برنامه چندقطبی چندگانه (MMP)، روش تقریب دوقطبی گسسته (DDA) و روش تقریب دوقطبی گسسته کاهش یافته (RDDA) هستند. در روش‌های شبیه‌سازی مبتنی بر نظریه مای، حداکثر مقدار حد جمع در سری‌های مای و دبی باید تخمین زده شود. رفتار همگرایی این سری‌ها می‌تواند اندکی تحت تأثیر ضریب شکست و حد جمع قرار گیرد [۲۶-۲۸]. روش‌های اجزای محدود و تفاضل محدود در حوزه زمان، روش‌های مفیدی در بررسی توزیع میدان الکترومغناطیسی در کل فضا هستند [۲۹ و ۳۰]. روش برنامه چند قطبی، یک روش محاسباتی در حوزه بسامد است. در این روش، میدان‌ها به‌صورت برهم‌نهی خطی توابع پایه که با استفاده از نظریه مای به‌دست آمده‌اند، محاسبه می‌شوند [۳۱ و ۳۲]. تقریب دوقطبی گسسته یک روش شناخته شده برای شبیه‌سازی عددی میدان الکترومغناطیسی پراکنده شده توسط ریزذرات دی‌الکتریک با ساختارها و اشکال دلخواه است. در این روش، یک جسم پراکنده نوری به دوقطبی‌های اولیه گسسته می‌شود و با در نظر گرفتن دامنه و جهت دوقطبی‌های القایی،

میدان نهایی با برهم‌نهی تابش‌های دوقطبی القایی محاسبه می‌شود [۳۳ و ۳۴]. روش تقریب دوقطبی گسسته کاهش یافته روش پیشنهادی در کار قبلی گروه ما است که بر اساس برهم‌نهی میدان‌های تابشی دوقطبی القایی با تعداد نقاط شبکه کاهش یافته از سطح ریزذرات عمل می‌کند [۳۵].

در این مقاله با استفاده از روش تقریب دوقطبی گسسته کاهش یافته (RDDA) به بررسی PNJهای تولید شده از میکروساختارهایی با ساختار توری فازی حلقوی منظم، توری فازی مطابق با مناطق فرنل و توری فازی ترکیبی چند منطقه فرنل می‌پردازیم. در ساختارهای معرفی شده شکل و مشخصات ابعادی (طول و عرض) PNJها و محل تشکیل آنها با توجه به سه ساختار پیشنهادی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که در ساختارهای منظم، طول PNJها در مقایسه با ساختارهای مناطق فرنل، بلندتر بوده و چگالش انرژی نور در محدوده وسیعی تولید می‌شود. بنابراین، ساختارهای منظم قدرت جمع‌کنندگی کمتری نسبت به ساختار مناطق فرنل از خود نشان می‌دهد. از طرفی با ترکیب چند منطقه فرنل در ساختار جدید پیشنهاد شده، امکان تولید PNJها به‌صورت همزمان در راستای انتشار نور فراهم شده است. این ساختارها امکان تشکیل دو یا چند محل کانونی (محل تشکیل PNJها) را در راستای محور انتشار امکان پذیر می‌سازند. از این‌رو، در ساختارهای چند منطقه فرنل امکان کنترل تعداد و فاصله PNJهای تشکیل شده با تغییر تعداد حلقه‌های مناطق فرنل و شعاع مناطق چندگانه وجود دارد. قدرت تفکیک دو PNJ تشکیل شده در مجاورت هم، بستگی به طول موج فرودی، تعداد حلقه‌های فرنل و ابعاد کل ساختار دارد. بنابراین در ساختار پیشنهادی تعداد PNJها و محل و فاصله آنها قابل تنظیم بوده و امکان استفاده در پژوهش‌های مختلف اپتیک مانند: تله اندازی نوری چندگانه در راستای انتشار، استفاده از آنها به‌عنوان عدسی‌های چندکانونی در ابعاد میکرونی، و برهم‌کنش نوری PNJها با ذرات نانومتری برای بررسی میزان تحریک و گسیل پراکندگی از آنها را دارند.

۲. روش تقریب دوقطبی گسسته کاهش یافته

در روش تقریب دوقطبی گسسته کاهش یافته (RDDA) سطح جسم مورد مطالعه به صورت منظم در ابعادی کوچکتر از طول موج گسسته شده و سپس در هر نقطه از مش ایجاد شده، دوقطبی القایی موضعی به صورت تحلیلی محاسبه می‌شود. از برهم‌نهی میدان‌های تابشی دوقطبی‌های القایی با تعداد نقاط شبکه کاهش یافته از سطح ریزذرات که به صورت عددی محاسبه می‌شود، میدان کل PNPJ ایجاد شده با استفاده از نرم‌افزار متلب در کل فضا در محدوده میدان‌های نزدیک، میانی و دور به طور همزمان محاسبه می‌شود. شکل ۱. الف، ساختار کلی مش‌بندی ایجاد شده در سطح یک میکروکره و صفحه‌های مشاهده (صفحه‌های XY، ZY و XZ که میدان در آنها به صورت طرح دو بعدی محاسبه می‌شود) را نشان می‌دهد. در شکل ۱. ب، مسیر هندسی پرتوهای فرودی از چشمه S به سطح میکروکره و محل دوقطبی‌های القایی ایجاد شده در دو سطح فرودی SI و خروجی SII را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، معادلات میدان حاصل از دوقطبی‌های القایی در سطح را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\vec{E}(\vec{r}, \vec{p}) = \vec{E}_{NF}(\vec{r}, \vec{p}) + \vec{E}_{IF}(\vec{r}, \vec{p}) + \vec{E}_{FF}(\vec{r}, \vec{p}) \quad (1)$$

در این معادله $\vec{E}_{NF}(\vec{r}, \vec{p})$ میدان نزدیک، $\vec{E}_{IF}(\vec{r}, \vec{p})$ میانی و $\vec{E}_{FF}(\vec{r}, \vec{p})$ میدان دور تابشی از دوقطبی‌های القایی است. این معادلات از تابش یک دوقطبی القایی به صورت زیر بدست می‌آیند [۳۶]:

$$\vec{E}_{NF}(\vec{r}, \vec{p}) = +\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r^2} \left[\hat{r} \times (\hat{r} \times \vec{p}) + 2(\hat{r} \cdot \vec{p}) \hat{r} \right] \quad (2)$$

$$\vec{E}_{IF}(\vec{r}, \vec{p}) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ik}{r^2} \left[\hat{r} \times (\hat{r} \times \vec{p}) + 2(\hat{r} \cdot \vec{p}) \hat{r} \right]$$

$$\vec{E}_{FF}(\vec{r}, \vec{p}) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{k^2}{r} \left[\hat{r} \times (\hat{r} \times \vec{p}) \right]$$

که در آن ϵ_0 ، k ، $\hat{r}$ و $\vec{p}$ به ترتیب تابع گذردهی الکتریکی خلاء، اندازه عدد موج در محیط مادی، بردار یک‌ه مکان و بردار دوقطبی القایی در نقاط مش‌بندی شده روی سطح میکروکره است. مولفه‌های میدان الکتریکی کل داخل و خارج تابش شده از میکروذرات را می‌توان به صورت جمع بر روی میدان‌های

انتشاری خارجی و میدان‌های بازتابی داخلی نوشت:

$$\vec{E}_{int}(\vec{r}) = \sum_{j=1}^{N_{SI}} \vec{E}_j^t(\vec{r}, \vec{r}_j, \vec{p}_j) + \sum_{j=1}^{N_{SI}} \sum_{k=1}^{N_{SII}} \vec{E}_{jk}^r(\vec{r}, \vec{r}_{jk}, \vec{p}_{jk}) \quad (3)$$

$$\vec{E}_{ext}(\vec{r}) = \sum_{j=1}^{N_{SI}} \vec{E}_j^r(\vec{r}, \vec{r}_j, \vec{p}_j) + \sum_{j=1}^{N_{SI}} \sum_{k=1}^{N_{SII}} \vec{E}_{jk}^t(\vec{r}, \vec{r}_{jk}, \vec{p}_{jk})$$

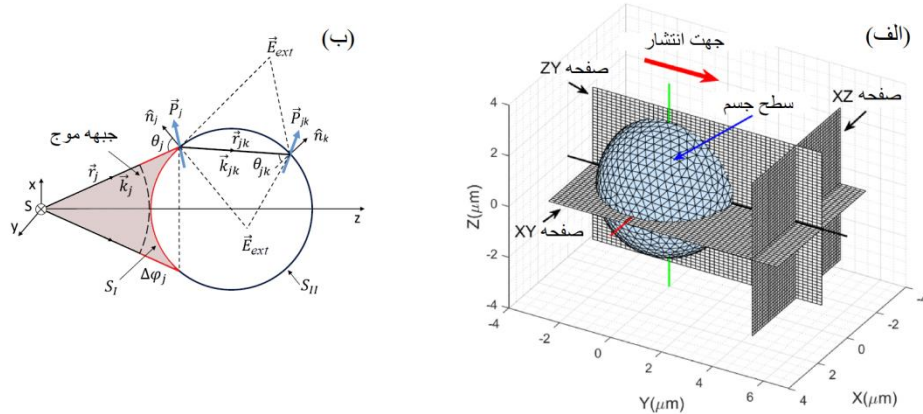
در این معادلات زیرنویس‌های j و k تعداد مش‌های مربوط به سطح فرودی (SI) و سطح خروجی (SII) است. همچنین $\vec{r}_j$ و $\vec{p}_j$ مکان و دوقطبی القایی سطح فرودی، $\vec{r}_{jk}$ و $\vec{p}_{jk}$ مکان و دوقطبی القایی سطح خروجی هستند. زیرنویس‌های r و t در میدان‌های داخل جمع، نشان دهنده میدان‌های انتشاری به خارج و میدان‌های بازتابی به داخل میکروکره است. جزییات کامل میدان‌های محاسبه شده در مقاله [۳۵] گزارش شده است. با استفاده از روش RDDA میدان PNPJ تولید شده از میکروساختارهای مختلف با ساختار توری فازی حلقوی منظم، توری فازی مطابق با مناطق فرنل و توری فازی ترکیبی چند منطقه فرنل برای تحلیل شکل و محل تشکیل آنها مورد بررسی قرار گرفته است که در بخش نتایج به آن می‌پردازیم.

۳. نتایج شبیه‌سازی تولید PNPJها در ساختارهای مختلف

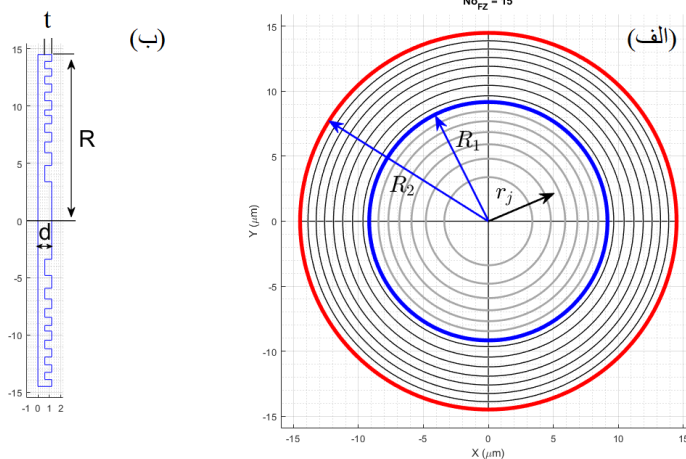
در این بخش نحوه طراحی ساختارهای توری فازی ترکیبی چند منطقه فرنل و محاسبه فاصله کانونی و شعاع هر منطقه توضیح داده شده است و در بخش‌های بعدی برای ساختارهای مختلف، میدان PNPJ تولید شده بررسی شده است.

۳.۱. محاسبه پارامترهای توری فازی ترکیبی

در این بخش هدف محاسبه شعاع مناطق تقسیم R_i ، فاصله کانونی هر منطقه f_i و در نهایت شعاع حلقه‌های داخلی هر منطقه r_i است. با توجه به شکل ۲. الف، میکروساختار پیشنهادی به صورت یک قرص به شعاع R در نظر گرفته شده است. در این میکروساختار، قرص به دو ناحیه با شعاع-های R_1 و R_2 تقسیم شده است و برای هر ناحیه دو کانون با مقادیر f_1 و f_2 در نظر گرفته شده است. بنابراین ساختار به صورت یک میکروعدسی با دو کانون قادر به تولید PNPJهایی در محل‌های کانون اصلی (f_1 و f_2) در راستای



شکل ۱. (الف) ساختار کلی مش‌بندی ایجاد شده در سطح یک میکروکره و صفحه‌های مشاهده (صفحه‌های XY، XZ و ZY)، (ب) مسیر پرتوهای فرودی از چشمه S به سطح میکروزره و محل دوقطبی‌های القایی در دو سطح فرودی SI و خروجی SII را نشان می‌دهند [۳۵].



شکل ۲. طرح‌واره‌ای از میکروساختار پیشنهادی، (الف) تقسیم مناطق به دو ناحیه با شعاع‌های R_1 و R_2 که از معادله (۶) محاسبه شده و همچنین حلقه‌های فرنل داخلی r_j که از معادله (۸) بدست آمده است. (ب) سطح مقطع قرص به ضخامت $d = \lambda$ با ضخامت حلقه‌های فرنل $t = \frac{d}{p}$ نشان داده شده است. در این ساختار ضریب شکست محیط اطراف $n_1 = 1$ ، ضریب شکست قرص $n = 1/5$ است. میدان فرودی پرتوی لیزر با شعاع کمر $w_0 = R$ و طول موج 600 نانومتر است.

است. با توجه به آن‌که میدان الکترومغناطیسی انتخاب شده در این شبیه‌سازی نور لیزر با رخ‌نمای گاوسی و قطبش خطی است، در محاسبه اندازه مناطق تقسیم (شعاع‌های R_i)، شدت میدان الکتریکی کل فرودی به هر منطقه (یا همان شار میدان الکتریکی که برابر با انتگرال میدان الکتریکی روی سطح (است) با استفاده از انتگرال سطحی محاسبه می‌شود. با برقراری تساوی شار میدان الکتریکی همه مناطق تقسیم شده (P_i)، شعاع هر منطقه (R_i) قابل محاسبه است. در این صورت انرژی متوسط پراکنده شده از تمام مناطق تقسیم برابر بوده و تحلیل شدت در محل‌های تشکیل PNPJها مستقل از مقدار

محور نوری خواهد بود. در شکل ۲. ب، ساختار کلی نمایش داده شده است.

در این شکل ضخامت قرص $d = \lambda$ با ضریب شکست $n = 1/5$ و ضخامت حلقه‌های فرنل $t = \frac{d}{p}$ انتخاب شده است. با توجه به آن‌که ضریب شکست محیط اطراف $n_1 = 1$ است، با انتخاب ضخامت قرص λ و ضریب شکست قرص $n = 1/5$ ، اختلاف فاز دو منطقه مجاور فرنل برابر $\Delta\varphi = \pi$ خواهد شد.

در این قسمت نحوه محاسبه شعاع مناطق تقسیم R_i ارائه شده

انرژی هر منطقه خواهد بود.

شدت میدان الکتریکی متوسط (شار میدان الکتریکی) در منطقه i ام (P_i) به صورت انتگرال سطحی از میدان گاوسی در محدوده شعاع R_{i-1} الی R_i به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_i = 2\pi E_0 \int_{R_{i-1}}^{R_i} e^{-\left(\frac{r}{w_i}\right)^2} r dr \quad (4)$$

جواب انتگرال بالا به صورت زیر بدست می‌آید:

$$P_i = -\pi E_0 w_i^2 \left\{ e^{-\left(\frac{R_i}{w_i}\right)^2} - e^{-\left(\frac{R_{i-1}}{w_i}\right)^2} \right\} \quad (5)$$

در این معادلات E_0 دامنه میدان گاوسی اولیه، w_i شعاع کمر باریکه لیزر در محل برخورد با قرص و R_i شعاع مناطق تقسیم است. با برقراری تساوی بین P_i های مناطق تقسیم، و حل رابطه بازگشتی، شعاع منطقه تقسیم R_i به صورت شکل کلی زیر محاسبه می‌شود (مراجعه به پیوست مقاله):

$$R_i = \sqrt{-w_i^2 \ln\left(\frac{i}{N_g} e^{-\left(\frac{R}{w_i}\right)^2} + \frac{N_g - i}{N_g}\right)} \quad (6)$$

در این معادله، R شعاع قرص و N_g تعداد تقسیمات انتخاب شده است. با مشخص شدن شعاع مناطق تقسیم (R_i) می‌توان فاصله کانونی f_i منطقه تقسیم را به دلخواه انتخاب کرد. برای ساختارهای شبیه‌سازی شده فواصل کانونی هر منطقه به صورت منظم در نظر گرفته شده‌اند تا بتوان تحلیل‌های دقیق‌تری را انجام داد. فواصل کانونی هر منطقه برحسب فاصله کانونی متوسط اولیه f_{avg} (فاصله کانونی اصلی) به صورت رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f_i = f_{avg} + \left\{ \frac{2(i-1) - (N_g - 1)}{2} \right\} \Delta f \quad (7)$$

در این رابطه Δf مقدار عددی گام‌های اختلاف بین فواصل کانونی هر منطقه است. برای مثال برای تقسیم قرص به دو ناحیه ($N_g = 2$) دو کانون به صورت $f_1 = f_{avg} - \frac{1}{2} \Delta f$ و $f_2 = f_{avg} + \frac{1}{2} \Delta f$ محاسبه می‌شوند. بنابراین، معادله تقسیم کانون‌های مناطق مختلف به گونه‌ای انتخاب شده است که مقدار متوسط f_1 ‌ها برابر با f_{avg} و فاصله متوالی آنها Δf باشد. با مشخص شدن شعاع و فاصله کانونی هر منطقه تقسیم، می‌توان هر منطقه را با استفاده از رابطه مناطق فرنل به

حلقه‌های پراش فرنل گونه تقسیم‌بندی کرد. شعاع مناطق فرنل در میکروساختار با استفاده از رابطه بدون تقریب مناطق فرنل محاسبه شده است. علت این انتخاب آن است که در این ساختارها مقدار فاصله کانونی و قطر قرص در محدوده چند میکرومتر انتخاب شده است تا PNJ‌هایی به شدت کانونی و متمرکز کننده تولید شوند. از طرفی، مقدار عددی فاصله کانونی متوسط (f_{avg}) برابر با چند ده طول موج انتخاب شده است تا اثرات میدان نزدیک در PNJ‌ها قوی‌تر باشد. بنابراین، در ساختارهای شبیه‌سازی شده مقدار گشودگی عدد میکروساختار بزرگ‌تر از حد تقریب پیرامحوری است. شعاع مناطق فرنل میکروساختار از رابطه زیر بدست می‌آید [۳۷]:

$$r_i = \sqrt{j\lambda f_i + \left(j\frac{\lambda}{4}\right)^2} \quad (8)$$

در این معادله j شماره منطقه فرنل داخلی، f_i فاصله کانونی منطقه تقسیم i ام با شعاع تقسیم R_i و λ طول موج نور فرودی است (مراجعه به شکل ۲).

۳.۲. تولید PNJ از ساختار دوره منظم

در این بخش PNJ تولید شده از یک قرص با ساختار حلقوی با فواصل دوره منظم بررسی شده است. شکل ۳. الف، PNJ تولید شده با پرتوی نورلیزر گاوسی با قطبش خطی موازی با صفحه تابش (صفحه XZ) با شعاع کمر باریکه برابر با شعاع قرص در طول موج ۶۰۰ نانومتر را نشان می‌دهد. در این ساختار شعاع قرص ۱۰ میکرومتر و ضخامت قرص ۱۲۰۰ نانومتر (دوبرابر طول نور فرودی) انتخاب شده است.

همچنین تعداد حلقه‌های پراش $N = 10$ انتخاب شده که برابر با تعداد حلقه‌های فرنل در ساختاری با ابعاد هندسی مشابه است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود PNJ تولید شده در راستای محور عرضی (محور X) متمرکز شده ولی در راستای محور طولی (محور Z) دارای گسترده‌گی خطی طولانی است. با توجه به آن‌که شعاع حلقه‌های داخلی در این ساختار در فواصل یکسان از هم قرار داده شده‌اند، ساختار بالا شبیه یک میکروعدسی با سطح مخروطی شکل (عدسی‌های مخروطی شکل با نام اکسیکون) عمل می‌کند و تولید PNJ طولی در آن رخ می‌دهد. شکل‌های ۳. ب و ج، رخ‌نمای شدت میدان

جدول ۳. مقادیر عددی به کار رفته برای شبیه سازی ساختار فرنل دوکانونی و مکان PNPJ های تشکیل شده (f_p و f_n).

$R(\mu m)$	$d(nm)$	$t(nm)$	N	$f_p(\mu m)$	$f_n(\mu m)$	$f_{avg}(\mu m)$
۱۰	۱۲۰۰	۶۰۰	۱۰	۴/۴۸	۷	۵

تقسیم، فاصله کانونی آنها و شعاع مناطق فرنل هر ناحیه با استفاده از معادلات (۶)–(۸) محاسبه شده اند.

همان طوری که دیده می شود، PNPJ های دوتایی در دو مکان f_p و f_n با مقادیر نشان داده شده در شکل تشکیل شده است. با توجه به آن که مقادیر عددی این دو کانون در محاسبه شعاع حلقه های فرنل، $3/5$ و $6/5$ میکرومتر انتخاب شده بود، PNPJ های تولید شده در مکان های متفاوت $4/48$ و 7 میکرومتری از سطح اول قرص تشکیل شده اند. علت این اختلاف ضخامت $1/2$ میکرومتری قرص و همچنین اثرات ناشی از تولید میدان PNPJ ها بر مبنای تابش دوقطبی های القایی در هر سه محدوده میدان نزدیک، میدان میانی و میدان دور است (با توجه به معادلات (۱)–(۳)). این اختلاف مکان در تمامی شبیه سازی ها برای ساختارهای تک کانونی، دوکانونی و چندکانونی مشاهده شده است. جدول ۳ مشخصات عددی ساختار فرنل دوکانونی و مکان تشکیل PNPJ (f_p و f_n) را نشان می دهد.

۳.۴. ۱. بررسی تحول PNPJ های ساختار فرنل دوکانونی بر حسب تغییر فاصله کانونی متوسط f_{avg}

برای بررسی دقیق تر و درک بهتر تحول شکل و مکان تشکیل PNPJ ها در ساختار فرنل دوکانونی، با تغییر مقدار فاصله کانونی متوسط f_{avg} در محدوده ۳ الی ۱۳ میکرومتر با گام ۲ میکرومتر، شکل و فاصله تقریبی PNPJ ها مورد بررسی قرار گرفته است. در تمامی ساختارهای نمایش داده شده در شکل ۶ کمیت های مورد استفاده شده یکسان هستند. با توجه به شکل های ۶. الف-س، با افزایش مقدار فاصله کانونی متوسط (f_{avg})، شعاع مناطق فرنل (R_f) بزرگتر شده و تعداد حلقه های داخل مناطق تقسیم (R_i) کاهش پیدا می کنند. بنابراین با کاهش تعداد حلقه های فرنل در هر منطقه و افزایش فواصل کانونی مناطق تقسیم (f_p و f_n)، طول PNPJ های تولید

جدول ۱. مقادیر عددی به کار رفته برای شبیه سازی ساختار دوره ای منظم و مکان PNPJ های تشکیل شده (f_p و f_n).

$R(\mu m)$	$d(nm)$	$t(nm)$	N	$f_p(\mu m)$	$f_n(\mu m)$
۱۰	۱۲۰۰	۶۰۰	۱۰	۴/۷۸	۹/۲۸

جدول ۲. مقادیر عددی به کار رفته برای شبیه سازی ساختار فرنل تک کانونی و مکان PNPJ های تشکیل شده (f_p و f_n).

$R(\mu m)$	$d(nm)$	$t(nm)$	N	$f_p(\mu m)$	$f_n(\mu m)$	$f_{avg}(\mu m)$
۱۰	۱۲۰۰	۶۰۰	۱۰	۶/۰۴	۷/۸۴	۵

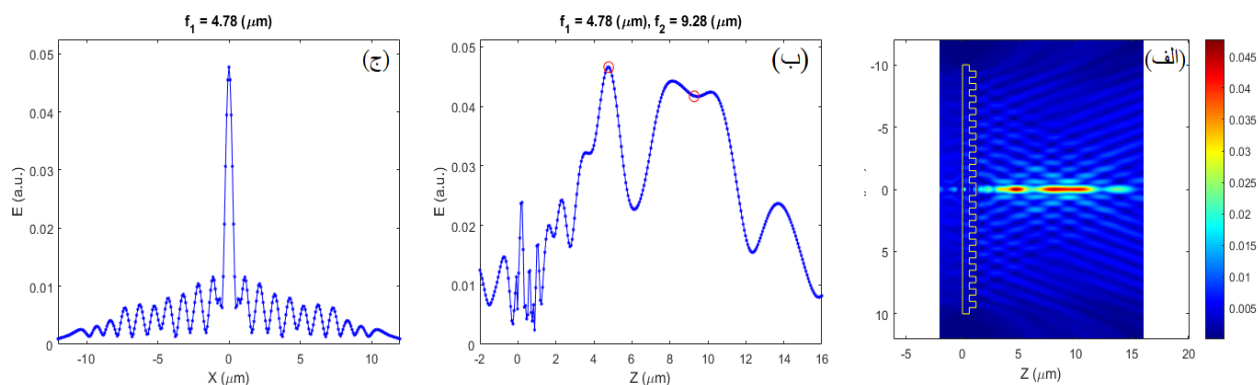
الکتریکی طولی و عرضی را به ترتیب نشان می دهند. جدول ۱ مشخصات عددی ساختار دوره ای منظم و مکان تشکیل PNPJ ها (f_p و f_n) را نشان می دهد.

۳.۳. تولید PNPJ از ساختار فرنل تک کانونی

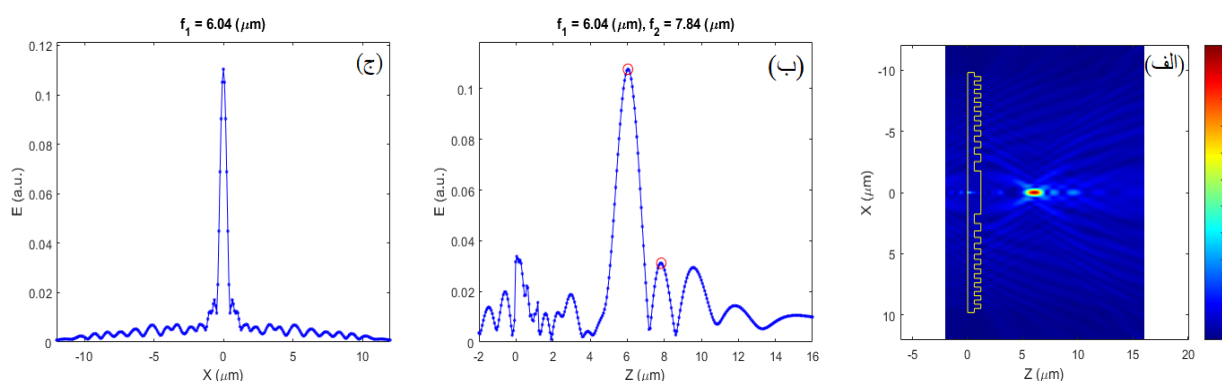
PNJ تولید شده از قرص با ساختار حلقه های فرنل و فاصله کانونی متوسط $f_{avg} = 5 \mu m$ و شعاع قرص 10 میکرومتر و تعداد حلقه های پراش $N=10$ در شکل ۴. الف نشان داده شده است. ساختار بالا از نظر ابعاد، ضریب شکست محیط و قرص و طول موج فرودی مشابه ساختار شکل ۳ انتخاب شده است. با مقایسه شکل ها، PNPJ تولید شده در هر دو ساختار دیده می شود که وجود حلقه های فرنل باعث تولید PNPJ جایگزیده و متمرکز در محل کانون شده است. با توجه به شکل های ۴. ب و ج و مقایسه آن ها با شکل های ۳. ب و ج دیده می شود در ساختار فرنل تک کانونی، PNPJ به صورت متمرکز و جایگزیده تشکیل شده است. جدول ۲ مشخصات عددی ساختار فرنل تک کانونی و مکان تشکیل PNPJ (f_p و f_n) را نشان می دهد.

۳.۴. تولید PNPJ از ساختار فرنل دوکانونی

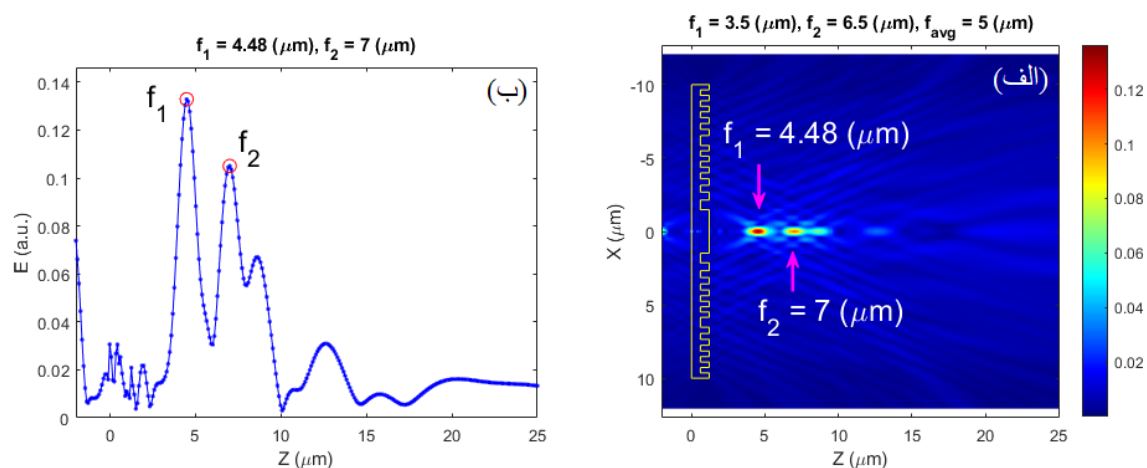
در این بخش ساختار فرنل دوکانونی برای تولید PNPJ های همزمان معرفی می شود. در شکل های ۵. الف و ب، یک نمونه بهینه شده از این ساختار به همراه طرح شدت طولی نمایش داده شده است. در این ساختار شعاع قرص 10 میکرومتر، فاصله کانونی متوسط 5 میکرومتر، طول موج نور لیزر گاوسی 600 نانومتر، قطبش نور فرودی خطی و موازی صفحه تابش انتخاب شده است. همچنین شعاع مناطق



شکل ۳. (الف) PNJ تولید شده از ساختار دوره‌ای منظم با پرتوی نورلیزر گاوسی با قطبش خطی موازی با صفحه تابش (صفحه XZ) با شعاع کمر باریکه برابر با شعاع قرص در طول موج ۶۰۰ نانومتر را نشان می‌دهد. در این ساختار شعاع قرص ۱۰ میکرومتر و ضخامت قرص ۱۲۰۰ نانومتر (دوبرابر طول موج نور فرودی) انتخاب شده است. (ب) و (ج) رخ‌نمای شدت میدان الکتریکی طولی و عرضی را به‌ترتیب نشان می‌دهند.



شکل ۴. (الف) PNJ تولید شده از ساختار فرنل تک‌کانونی با فاصله کانونی متوسط $f_{avg} = 5 \mu m$ نوردهی شده با پرتوی نورلیزر گاوسی با قطبش خطی موازی با صفحه تابش (صفحه XZ) با شعاع کمر باریکه برابر با شعاع قرص در طول موج ۶۰۰ نانومتر را نشان می‌دهد. در این ساختار شعاع قرص ۱۰ میکرومتر و ضخامت قرص ۱۲۰۰ نانومتر (دوبرابر طول موج نور فرودی) انتخاب شده است. (ب) و (ج) رخ‌نمای شدت میدان الکتریکی طولی و عرضی را به‌ترتیب نشان می‌دهند.



شکل ۵. (الف) PNJ تولید شده از ساختار فرنل دوکانونی با فاصله کانونی متوسط $f_{avg} = 5 \mu m$ و اختلاف فواصل کانونی $\Delta f = 3 \mu m$ نوردهی شده با پرتوی نورلیزر گاوسی با قطبش خطی موازی با صفحه تابش (صفحه XZ) با شعاع کمر باریکه برابر با شعاع قرص در طول موج ۶۰۰ نانومتر را نشان می‌دهد. در این ساختار شعاع قرص ۱۰ میکرومتر و ضخامت قرص ۱۲۰۰ نانومتر (دوبرابر طول موج نور فرودی) انتخاب شده است. (ب) رخ‌نمای شدت میدان الکتریکی طولی را نشان می‌دهند.

جدول ۴. مقادیر عددی به کار رفته برای شبیه سازی ساختار فرنل دوکانونی با فواصل کانونی متوسط f_{avg} در محدوده ۳-۱۳ میکرون.

	$R(\mu m)$	$d(nm)$	$t(nm)$	$f_1(\mu m)$	$f_2(\mu m)$	$f_{avg}(\mu m)$
الف	۱۰	۱۲۰۰	۶۰۰	۱/۵	۴/۵	۳
ب	۱۰	۱۲۰۰	۶۰۰	۳/۵	۶/۵	۵
ج	۱۰	۱۲۰۰	۶۰۰	۵/۵	۸/۵	۷
د	۱۰	۱۲۰۰	۶۰۰	۷/۵	۱۰/۵	۹
ر	۱۰	۱۲۰۰	۶۰۰	۹/۵	۱۲/۵	۱۱
س	۱۰	۱۲۰۰	۶۰۰	۱۱/۵	۱۴/۵	۱۳

شده افزایش یافته و میزان جدایی آن ها کاهش می یابد، به طوری که در نهایت یک PNJ (مطابق شکل ۶. س) ایجاد می شود. بنابراین، برای تولید دو PNJ مجزا، شعاع قرص (R) و اندازه فاصله کانونی متوسط باید تنظیم شود. با توجه به شکل ۶، نمونه (ب) بهترین حالت تفکیک را از خود نشان می دهد که در شکل ۵. الف مشخصات آن توضیح داده شده است. در این ساختارها اختلاف فواصل کانونی هر منطقه $\Delta f = 3\mu m$ انتخاب شده است.

جدول ۴ مشخصات عددی ساختارهای فرنل دوکانونی با فواصل کانونی متوسط f_{avg} در محدوده ۳ الی ۱۳ میکرومتر با گام ۲ میکرون و مکان تشکیل PNJ (f_1 و f_2) را نشان می دهد.

۳.۲.۴. بررسی تحول PNJ های ساختار فرنل دوکانونی بر

حسب تغییر شعاع قرص R

در این بخش با تغییر شعاع قرص در محدوده ۶ الی ۱۱ میکرومتر تحول PNJ های تولید شده مورد بررسی قرار گرفته است. شکل های ۷. الف-س، نحوه تغییرات PNJ های تولید شده را نشان می دهند. در تمامی این ساختارها فاصله کانونی متوسط $f_{avg} = 5\mu m$ و اختلاف بین فواصل کانونی هر منطقه $\Delta f = 3\mu m$ انتخاب شده است. همان طوری که مشاهده می شود، PNJ های تولید شده در راستای محور عرضی (محور X) محصور شده و در راستای محور طولی (محور Z) با گستردگی خطی در دو مکان مجزا تشکیل شده اند. با توجه به

جدول ۵. مقادیر عددی به کار رفته برای شبیه سازی ساختار فرنل دوکانونی با شعاع قرص R در محدوده ۶-۱۱ میکرون.

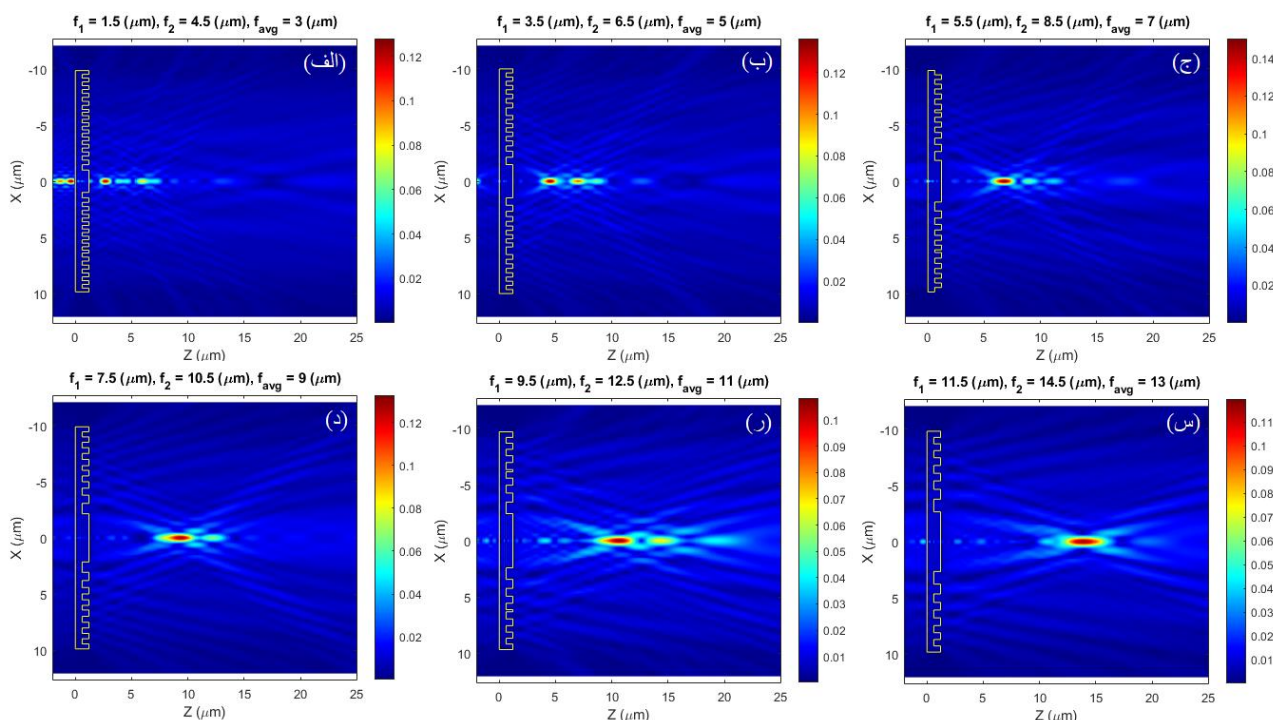
	$R(\mu m)$	$d(nm)$	$t(nm)$	$f_1(\mu m)$	$f_2(\mu m)$	$f_{avg}(\mu m)$
الف	۶	۱۲۰۰	۶۰۰	۳/۵	۶/۵	۵
ب	۷	۱۲۰۰	۶۰۰	۳/۵	۶/۵	۵
ج	۸	۱۲۰۰	۶۰۰	۳/۵	۶/۵	۵
د	۹	۱۲۰۰	۶۰۰	۳/۵	۶/۵	۵
ر	۱۰	۱۲۰۰	۶۰۰	۳/۵	۶/۵	۵
س	۱۱	۱۲۰۰	۶۰۰	۳/۵	۶/۵	۵

نتایج بدست آمده بهترین جدایی در حالت های (ب) و (ر) رخ داده است. با افزایش شعاع قرص R ، تعداد مناطق فرنل در هر ناحیه افزایش می یابد و قدرت جداسازی دو PNJ و شکل توزیع فضایی آن ها تغییر پیدا می کند.

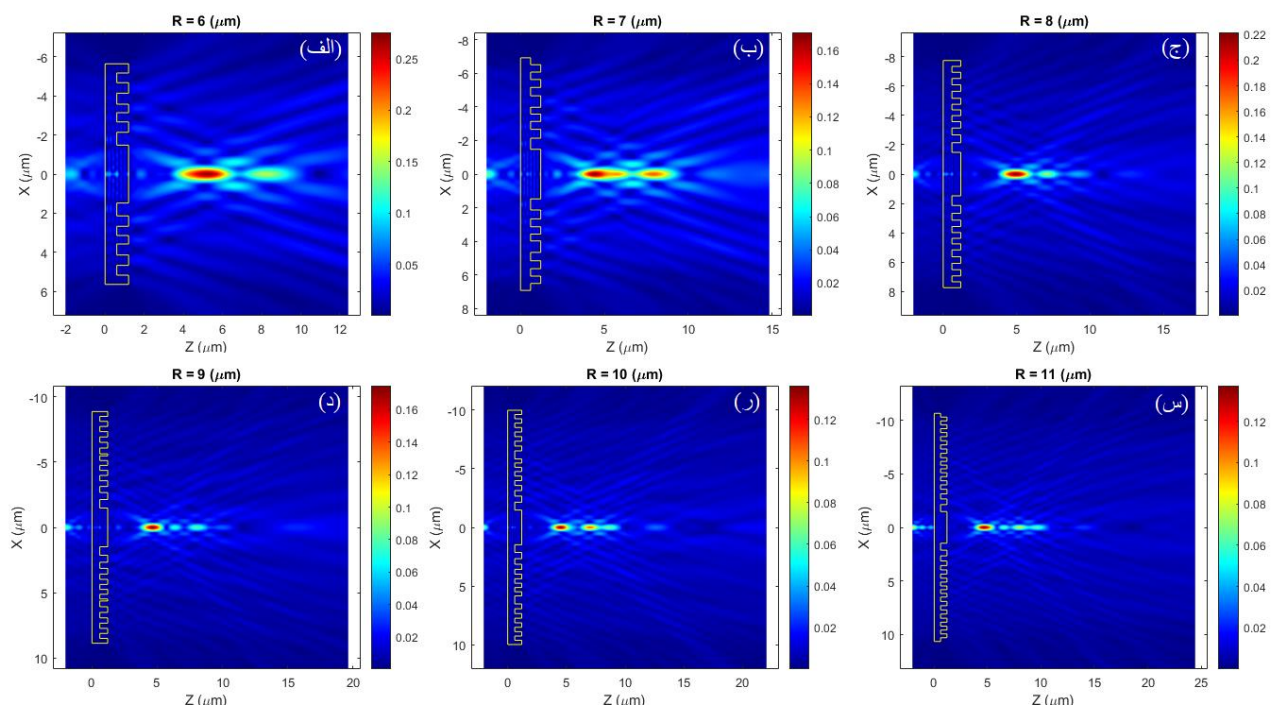
در حالت کلی با تغییر مقدار دو کمیت هندسی، شعاع قرص و فاصله کانونی متوسط، میزان جدایی PNJ ها قابل کنترل است. جدول ۵ مشخصات عددی ساختارهای فرنل دوکانونی با تغییر شعاع قرص R در محدوده ۶ الی ۱۱ میکرومتر با گام ۱ میکرون و مکان تشکیل PNJ (f_1 و f_2) را نشان می دهد.

۴. نتیجه گیری

با استفاده از تقریب دوقطبی گسسته کاهش یافته (RDDA) تحول شکل و نحوه توزیع PNJ های تولید شده در ساختارهای منظم، ساختارهای فرنل تک کانونی و ساختارهای فرنل دوکانونی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد با استفاده از حلقه های میکرومتری فرنل، امکان تولید PNJ هایی با جایگزیدگی بالا و قابل کنترل از لحاظ شکل، طول و عرض امکان پذیر بوده و با معرفی ساختارهای فرنل دوکانونی امکان تشکیل همزمان دو PNJ در راستای محور نوری (محور انتشار Z) وجود دارد. فاصله نسبی دو PNJ تشکیل شده با تغییر پارامترهای هندسی مانند فاصله کانونی متوسط f_{avg} و شعاع قرص R که منجر به تغییر در تعداد مناطق فرنل اصلی در هر منطقه تقسیم می شود قابل



شکل ۶. PNPJهای تولید شده از ساختار فرنل دوکانونی با فواصل کانونی متوسط $f_{\text{avg}} = 3-13 \mu\text{m}$ و اختلاف فواصل کانونی $\Delta f = 3 \mu\text{m}$ نوردهی شده با پرتوی نورلیزر گاوسی با قطبش خطی موازی با صفحه تابش (صفحه XZ) با شعاع کمر باریکه برابر با شعاع قرص در طول موج 600 nm را نشان می‌دهد. در این ساختارها شعاع قرص $10 \mu\text{m}$ و ضخامت قرص 1200 nm (دوبرابر طول موج نور فرودی) انتخاب شده است.



شکل ۷. PNPJهای تولید شده از ساختار فرنل دوکانونی با فاصله کانونی متوسط $f_{\text{avg}} = 5 \mu\text{m}$ و اختلاف فواصل کانونی $\Delta f = 3 \mu\text{m}$ نوردهی شده با پرتوی نورلیزر گاوسی با قطبش خطی موازی با صفحه تابش (صفحه XZ) با شعاع کمر باریکه برابر با شعاع قرص در طول موج 600 nm را نشان می‌دهد. در این ساختارها شعاع قرص در محدوده $R = 6-11 \mu\text{m}$ و ضخامت قرص 1200 nm (دوبرابر طول موج نور فرودی) انتخاب شده است.

اول با جمله دوم می توان شعاع R_1 را بر حسب R_2 و R_3 و با تساوی قرار دادن جمله دوم با جمله سوم می توان شعاع R_4 را بر حسب R_1 و R_2 و الی آخر بدست آورد. بنابراین، می توان در نهایت شعاع R_1 را بر حسب شعاع R_2 و شعاع R_{N_g} به صورت بازگشتی محاسبه کرد. با توجه به آن که شعاع منطقه صفرام برابر با صفر ($R_2=0$) و شعاع منطقه آخر (یا همان شعاع بیشینه) برابر با شعاع قرص فرنل ($R_{N_g}=R$) است، شعاع انتخابی R_1 بر حسب تعداد تقسیم (N_g)، شعاع قرص (R) و شعاع کمر باریکه (W) محاسبه می شود.

با محاسبه مقدار اولین شعاع (R_1)، می توان با استفاده مجدد از رابطه تساوی بالا، شعاع منطقه دوم (R_2) را بر حسب R_1 به دست آورد. بنابراین، با بازنویسی رابطه بازگشتی معادله کلی (معادله (۶)) محاسبه شده است. در تمام شبیه سازی های انجام شده، اندازه شعاع قرص فرنل با شعاع پرتوی گاوسی هم اندازه در نظر گرفته شده است ($R=W$). با این انتخاب تمامی شدت پرتوی فرودی بدون اتلاف وارد قرص نانومتری فرنل شده و بیشینه شدت در نانو جت های خروجی حاصل می شود.

کنترل است. این کنترل پذیری امکان بهینه سازی میزان جایگزیدگی عرضی و طولی و همچنین فاصله نسبی دو PNJ تشکیل شده را میسر می سازد. از PNJ های چندکانونی می توان در پژوهش های مختلف مانند: تله اندازی نوری چندگانه، میکرو عدسی های چندکانونی و برهم کنش نور- ماده استفاده کرد.

۵. پیوست

در این بخش به اثبات معادله (۶) می پردازیم. با برقراری تساوی بین شدت های متوسط P_i به روابط بازگشتی زیر می رسم:

$$P_1 = P_2 = \dots = P_{N_g}$$

در این تساوی زیر نویس i در بازه ($1 \leq i \leq N_g$) قرار داشته و هر عدد نشان دهنده شماره منطقه تقسیم است. با جایگذاری از معادله (۵) داریم:

$$\{e^{-\left(\frac{R}{w_1}\right)^2} - e^{-\left(\frac{R}{w_2}\right)^2}\} = \{e^{-\left(\frac{R}{w_2}\right)^2} - e^{-\left(\frac{R}{w_3}\right)^2}\} = \dots = \{e^{-\left(\frac{R_{N_g}}{w_1}\right)^2} - e^{-\left(\frac{R_{N_g-1}}{w_1}\right)^2}\}$$

با توجه با رابطه بازگشتی بدست آمده، می توان دید که در جملات داخل کروشه {...} پارامتر شعاع تقسیم به صورت تکراری ظاهر شده است. بنابراین، با تساوی قرار دادن جمله

۶. مراجع

1. Z Chen, A. Taflove, and V. Backman, *Opt. Express* **12** (2004) 1214.
2. X Li, Z Chen, A Taflove, et al., *Opt. Express* **13** (2005) 526.
3. I Mahariq and H Kurt, *J. Opt. Soc. Am. B* **32** (2015) 1022.
4. A Mandal and V Dantham, *AIP Conf. Proc.* **2220** (2020) 020162.
5. A Mandal and V R. Dantham, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **257** (2020) 107350.
6. A Mandal and V R. Dantham, *J. Opt. Soc. Am. B* **37** (2020) 977.
7. Y -X. Ren, X Zeng, L -M Zhou, et al., *ACS Photonics* **7** (2020) 1483.
8. W Wu, A. Katsnelson, O G. Memis, et al., *Nanotechnology* **18** (2007) 485302.
9. E Mcleod and C B Arnold, *Nat. Nanotechnol.* **3** (2008) 413.
10. J Kim, K Cho, I Kim, et al., *Appl. Phys Express* **5** (2012) 025201.
11. L A Krivitsky, J J Wang, Z Wang, et al., *Sci. Rep.* **3** (2013) 3501.
12. H Yang, R Trouillon, G Huszka, et al., *Nano Lett.* **16** (2016) 4862.
13. C Kuang, Y Liu, X Hao, et al., *Opt. Commun.* **285** (2012) 402.
14. A Heifetz, S -C Kong, A. V. Sahakian, et al., *J. Comput. Theor. Nanosci.* **6** (2009) 1979.
15. S Lee, L Li, and Z. Wang, *J. Opt.* **16** (2013) 015704.
16. J Zhu and L L Goddard, *Nanoscale Adv.* **1** (2019) 4615.
17. I V Minin, C Y Liu, Y E Geints, et al., *Photonics* **7** (2020) 41.
18. S C Kong, A Taflove, and V Backman, *Opt. Express* **17** (2009) 3722.
19. Y Shen, L V Wang, and J T Shen, *Opt. Lett.* **39** (2014) 4120.
20. P Kushwaha, H Patel, M Swami, et al., *Proc. SPIE* **9654** (2015) 96541H.
21. C Y Liu, *Physica E* **64** (2014) 23.
22. C Y Liu and F -C. Lin, *Opt. Commun.* **380** (2016) 287.
23. H Patel, P Kushwaha, and M. Swami, *Opt. Commun.* **415** (2018) 140.

24. T Wang, C Kuang, X. Hao, et al., *J. Opt.* **13** (2011) 035702.
25. Y Ben-Aryeh, *Appl. Phys. B* **91** (2008) 157.
26. W J Wiscombe, *Appl. Opt.* **19** (1980) 1505.
27. V Cachorro and L Salcedo, *J. Electromagn. Waves Appl.* **5** (1991) 913.
28. A Itagi and W Challener, *J. Opt. Soc. Am. A* **22** (2005) 2847.
29. J J Wang, D McCloskey, and J. F. Donegan, *Proc. SPIE* **8321** (2011) 1031.
30. A Darafsheh and D Bollinger, *Opt. Commun.* **402** (2017) 270.
31. T Jalali and D Erni, *J. Mod. Opt.* **61** (2014) 1069.
32. T Jalali, *Indian J. Phys.* **89** (2015) 729.
33. B T Draine and P. J. Flatau, *J. Opt. Soc. Am. A* **11** (1994) 1491.
34. Y E Geints, A. Zemlyanov, and E. Panina, *Atmos. Oceanic Opt.* **28** (2015) 436.
35. M R Ataii and J M Amjad, *Appl. Opt.* **63** (2024) 632543.
36. J R Reitz, “*Foundations of Electromagnetic Theory*”, Addison-Wesley, USA, (1979).
37. B D Guenther, “*Modern Optics*”, Oxford University Press, Oxford, United Kingdom, (2015).