

اندازه‌گیری نمایه ضریب شکست میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی به روش عددی

رامین توفیق موالو^۱، مسعود کاوش تهرانی^۲

چکیده: در این مقاله، با استفاده از الگوی تداخلی نیمه دایروی بدست آمده از تداخل‌سنجی برشی کلی شکل نمایه ضریب شکست تدریجی میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی ساخته با فرآیند تبادل یونی تعیین می‌شود. در ادامه با شبیه‌سازی انتشار باریکه گاوسی از این میکروعدسی تخت توسط نرم افزار Optiwave فاصله کانونی و نیم پهنای موج محاسبه می‌شود. همچنین نشان می‌دهیم که نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی بدست آمده از نمایه، توافق خوبی دارند.

واژه‌های کلیدی: میکروعدسی، نمایه ضریب شکست تدریجی، تداخل‌سنجی، روش عددی

۱. مقدمه

در حال حاضر، گسترده‌ترین روش مورد استفاده برای ساخت میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی، فرآیند تبادل یونی از طریق روزنه‌ی دایره‌ای روی بستر است. عوامل موثر بر فرآیند تبادل یونی و نمایه ضریب شکست، انتخاب نوع و هندسه بستر، نوع ترکیب مذاب، دما، زمان مبادله یونی و میدان الکتریکی اعمالی است. شیشه به دلیل اتلاف کم، ایمن در برابر آسیب‌های نوری، سازگار با سطوح فیبرهای تجاری و هزینه تولید پایین به عنوان یک بستر برای ساخت این نوع عدسی‌ها استفاده می‌شود. از لحاظ تئوری و تجربی چگونگی شکل‌گیری توزیع سه‌بعدی ضریب شکست در یک میکروعدسی

میکروعدسی‌های تخت با ضریب شکست تدریجی، اگر زمان مبادله یون‌های تک ظرفیتی بین ترکیب و بستر طولانی باشد شکل نفوذ یون‌ها در بستر تقریباً نیمه کروی خواهد شد. از اینرو شکل تغییرات غلظت و یا به عبارتی نمایه ضریب شکست تدریجی نیز دارای تابع کروی خواهد گردید. همچنین برای ایجاد تغییرات ضریب شکست بزرگ در زمان تبادل یونی، به بستر میدان الکتریکی اعمال می‌شود [۱]. میدان الکتریکی به علت تحرک کم برخی عناصر همچون Tl^+ ، از یک طرف به طرف دیگر بستر اعمال می‌شود که باعث اعمال نفوذ حرارتی و تحرک بیشتر یون‌ها در شیشه می‌شود. میدان الکتریکی اعمالی به روزنه‌ی بسیار کوچک روی بستر اکثراً باعث ایجاد نمایه ضریب شکست نیمه‌کروی می‌شود. باید توجه داشت که اختلال در میدان الکتریکی باعث ناهمگنی ضریب شکست و تا حدودی باردار شدن مکانی محصور و رسانایی متفاوت فضایی می‌شود.

۱ پژوهشکده علوم و فناوری اپتیک و لیزر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر

میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی در سامانه‌های تصویربرداری و در حوزه‌ی میکرواپتیک یعنی مخابرات فیبر نوری، ابزار الکترواپتیک و غیره کاربرد فراوان دارند [۴-۲]. در بکارگیری میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی لازم است که نمایه ضریب شکست و تغییرات آن بر حسب طول موج به دقت اندازه‌گیری شود. چون آگاهی از نمایه ضریب شکست تدریجی نه تنها برای تعیین عملکرد دستگاه‌های نوری (همچون فاصله‌ی کانونی، دهانه‌ی عددی، تصحیح ابیراهی، قطر پرتوی کانونی شده و ...) بلکه برای بهینه‌سازی شرایط ساخت مهم است. روش‌های زیادی برای اندازه‌گیری نمایه ضریب شکست از جمله روش تداخلی [۵]، روش میدان نزدیک [۶]، روش بازتابی [۷]، روش تصویربرداری [۸] و روش روبش میدان نزدیک [۹] وجود دارد. به علت پیچیده بودن برخی از این روش‌ها در اینجا یک روش عددی ارائه می‌گردد.

روش تداخل عرضی مشابه روش‌های ترموگرافی در حوزه‌های آیرودینامیک، زلزله‌شناسی، فیزیک پلاسما و فیزیک نجوم است. در این روش‌ها جابه‌جایی فازی یک موج کاوشگر از قبیل موج نوری یا یک موج زلزله، آشکارسازی می‌شود و برای محاسبه ساختار داخلی متقارن محوری یک هدف فازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش تداخل‌سنجی عرضی، یک فیبر نوری یا یک نمونه میله‌ای به عنوان یک اختلال فازی در نظر گرفته می‌شود که دارای نمایه ضریب شکست متقارن محوری است و اختلاف فازی نور کاوشگر فرودی از طریق جابه‌جایی فریز به وسیله یک فرمول آشکارسازی می‌شود. بنابراین در محاسبه نمایه ضریب شکست از جابه‌جایی فریز فرض شده است که باریکه کاوشگر فرودی بر روی نمونه یک مسیر مستقیم از میان نمونه را طی می‌کند و بنابراین لازم است که یک فرمول دقیق استخراج شود تا اینکه شکست پرتوی کاوشگر را اصلاح کند.

فرض می‌شود که یک فیبر نوری یا نمونه میله‌ای در یک روغن انطباق ضریب شکستی که دارای ضریب شکستی نزدیک به ضریب شکست غلاف نمونه است فرو برده می‌شود. با استفاده از یک میکروسکوپ تداخلی، راستای عرضی نمونه مشاهده می‌شود. باریکه کاوشگر بعد از طی کردن هسته، به وسیله یک تداخل‌سنج ماخ - زند به دو بازو تقسیم می‌شود و باریکه‌ی یکی از بازوها به وسیله یک منشور برشی جابه‌جا می‌شود. در اولین حالت هنگامی که مسافت برشی بزرگتر از اندازه هسته شود جبهه موج تخت یکی از باریکه‌های تقسیم شده با جبهه موج تاخیری دیگری تداخل می‌کند. بنابراین یک الگوی تداخلی معمولی (الگوی برشی کلی) مشاهده می‌شود. مقدار اندازه‌گیری شده جابه‌جایی فریز، اختلاف راه نوری عرضی هسته از غلاف بیرونی یا روغن انطباقی را بیان می‌کند و از مقادیر اندازه‌گیری شده جابه‌جایی فریز الگوی ضریب شکست حاصل می‌شود.

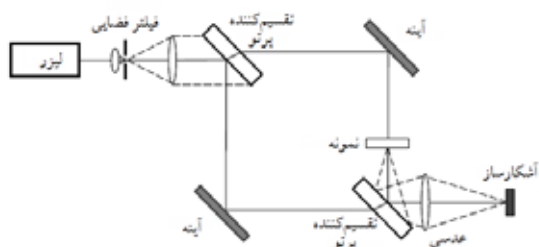
به عبارت دیگر هنگامی که مسافت برشی در مقایسه با اندازه هسته به اندازه کافی کوچکتر شود، جابه‌جایی فریز مشاهده شده به طور تقریبی دیفرانسیل اختلاف راه نوری را نسبت به مسافت عرضی بیان می‌کند.

هنگامی که شعاع هسته کوچکتر از چند صد میکرومتر باشد، تداخل‌سنجی معمولی برای اندازه‌گیری مناسب‌تر است زیرا در تداخل‌سنجی تفاضلی برای دستیابی به یک جابه‌جایی فریز مناسب، مسافت برشی نمی‌تواند در مقایسه با شعاع هسته به اندازه کافی کوچک شود.

به عبارت دیگر، هنگامی که شعاع هسته بیشتر از یک میلی‌متر باشد، همانطور که در مورد میله‌ها و عدسی‌های میله‌ای کانونی کننده وجود دارد، تداخل‌سنجی تفاضلی برای رصد و مشاهده، مناسب‌تر است، زیرا در تداخل‌سنجی معمولی به خاطر اختلاف راه نوری بزرگ جابه‌جایی فریز از میدان میکروسکوپ فراتر می‌رود. برای میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی سه بعدی نمایه ضریب شکست بصورت معادله زیر دارای ۱۶ ضریب است.

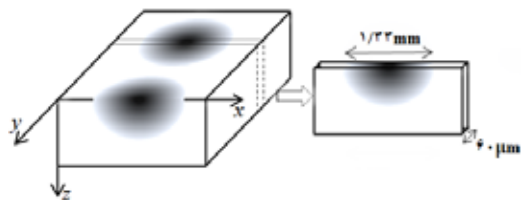
اختلاف راه نوری به شکل تابعی از طول‌موج و مشخصه‌های تغییرات ضریب شکست در سامانه مورد استفاده قرار داد.

منبع لیزر از نظر فضایی فیلتر شده و پس از موازی سازی به تقسیم‌کننده پرتو فرستاده می‌شود. به این ترتیب پرتو در بازوهای مرجع و تحت تداخل‌سنج تقسیم می‌شود. نمونه در بازوی تحت آزمایش قرار می‌گیرد. سپس دو پرتو در تقسیم‌کننده دوم با هم ترکیب می‌شوند. نتایج حاصل از الگوی تداخلی را می‌توان بر روی آشکارساز تصویر کرد.



شکل ۱: شماتیک تداخل‌سنج ماخ‌زندر استفاده شده برای اندازه‌گیری نمایه ضریب شکست.

اگر مطابق شکل ۲ برشی از میکروعدسی در بازوی تداخل‌سنج قرار گیرد، الگوی تداخلی به شکل فریزهای نیمه دایره‌ای تشکیل می‌شود. نمونه‌ای از میکروعدسی تخت تدریجی و قطعه‌ی بریده شده در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی و هندسه آماده‌سازی نمونه

$$n(r, z)^2 = n_0^2 \left[1 + (gz)^2 + (gz)^4 + (gz)^6 \right] \quad (1)$$

$$\times \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} & v_{14} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} & v_{24} \\ v_{31} & v_{32} & v_{33} & v_{34} \\ v_{41} & v_{42} & v_{43} & v_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ (gr)^2 \\ (gr)^4 \\ (gr)^6 \end{bmatrix}$$

که n_0 ضریب شکست در مرکز دهانه‌ی سطح عدسی و g یک ثابت بهنجار شده و تعیین کننده توان عدسی است. $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ شعاع دهانه میکروعدسی و Z محور نوری میکروعدسی را نشان می‌دهد. ما در این مقاله، از روی الگوی تداخل‌سنجی برشی کلی [۱۰]، یک روش عددی برای اندازه‌گیری نمایه ضریب شکست سه بعدی میکروعدسی تخت ساخته شده توسط فرآیند تبادل یونی ارائه کرده‌ایم. اگر چه شکل تابع بدست آمده مدلی برای حل معادله نفوذ فیک ارائه نمی‌کند اما روشی ساده و آسان برای محاسبه‌ی نمایه ضریب شکست بر حسب مختصه‌ی شعاعی و محوری با تعداد ضرایب کم نسبت به روش تداخلی با ۱۶ ضریب برازش است.

۲. روش برازش

تداخل‌سنج ماخ‌زندر یک تداخل‌سنج دو پرتو تک پالسی است. در این تداخل‌سنج نمونه با ضریب شکست متفاوت واقع در مسیر یکی از بازوها باعث تغییر در طول مسیر نوری می‌شود و این تغییرات موجب ایجاد اختلاف راه می‌گردد و نوارهای روشن و تاریک شکل می‌گیرد. فشردگی فریزهای تداخلی نشان‌دهنده اختلاف راه زیاد و گشودگی آنها نشان‌دهنده اختلاف راه کم است. شماتیک دستگاه تداخل‌سنج در شکل ۱ دیده می‌شود. منابع لیزری تک رنگ مختلف را می‌توان بمنظور اندازه‌گیری

نمونه باعث افزایش خطای اندازه‌گیری می‌شود. روش - های مختلف بریدن، صیقل دادن و سائیدن می‌تواند به از بین بردن حالت گوه‌ای و صافی انحنای سطح کمک کند. خطای معرفی شده توسط حالت گوه‌ای می‌تواند توسط چندین روش کمینه شود. نخست، اگر نمونه یک ناحیه همگن داشت فریزهای حالت گوه‌ای را می‌توان در تداخل‌سنج یا در پردازش داده حذف کرد. دوم، حالت گوه‌ای را می‌توان از طریق اندازه‌گیری ضخامت‌های سراسر نمونه اندازه‌گیری کرد و سپس در پردازش داده آن را حذف کرد. سوم، نمونه را می‌توان در یک مایع با ضریب شکست تطبیق شده فرو برد. در هر سه روش، خطای معرفی شده در اندازه‌گیری Δn برابر است با:

$$\frac{\delta(\Delta n)}{|\Delta n|} = \frac{\delta d}{d} \quad (۶)$$

که δd تغییر ضخامت در نمونه ناشی از گوه است، d متوسط ضخامت نمونه و $|\Delta n|$ مقدار کل تغییر ضریب شکست نمونه است. به این ترتیب فریزهای حالت گوه‌ای می‌تواند در یک تداخل‌سنج حذف شود؛ اما فریزهای ناشی از انحنای سطح نمونه، ایجاد خطا می‌کند که نمی‌تواند حذف شود. برای یک نمونه در هوا، خطای معرفی شده در نمایه ضریب شکست اندازه‌گیری برابر است با:

$$\frac{\delta(\Delta n)}{|\Delta n|} = \frac{\delta d(n-1)}{d|\Delta n|} \quad (۷)$$

که δd تغییر ضخامت ناشی از انحنای سطح یا نامنظمی است و n متوسط ضریب شکست نمونه است. اندازه‌گیری از یک نمونه واقع در یک شاره با ضریب شکست تطبیق شده منجر به بهبود قابل توجه در اندازه‌گیری خطا در اثر ناهماری‌های سطح می‌شود.

پس از بدست آوردن Δn ، می‌توان رابطه‌ی خطی بین نمایه ضریب شکست و توزیع غلظت یونی را بدست آورد.

نمونه عموماً یک شیئی فازی فرض می‌شود بطوریکه اختلاف مسیر نوری بین دو بازوی تداخل سنجی ماخ - زندر بصورت زیر تعیین می‌شود.

$$OPD(r, z) = \frac{\lambda}{2\pi} \phi(r, z) = m(r, z)\lambda = \Delta n(r, z)d \quad (۲)$$

که طول موج لیزر، ϕ اختلاف فاز بین دو بازوی تداخل - سنج، m مرتبه فریز و d ضخامت نمونه و Γ شعاع دهانه و $\Delta n(r, z)$ توزیع ضریب شکست سه بعدی است. از اینرو اگر بتوان اختلاف مرتبه‌ی فریز را به صورت شمارش فریز همراه با ضخامت نمونه اندازه‌گیری کرد، می‌توان نمایه ضریب شکست تدریجی را بصورت زیر تعیین می‌شود.

(۳)

$$\Delta n(r, z) = \frac{\lambda}{2\pi d} m(r, z)$$

از این رابطه می‌توان مقدار ضریب شکست فریز مرتبه‌ی m را به صورت زیر معین کرد.

$$n_s + \frac{\lambda m}{d} = n_m \quad (۴)$$

که در آن n_s ضریب شکست بستر است و شروع شمارش فریز m از بیرون الگوی تداخلی است. بنابراین از روی الگوی تداخلی با m تا فریز نیمه دایروی، مجموعه‌ی از n_m ها به دست می‌آید و از روی آنها می‌توان Δn را بدست آورد. عدم قطعیت تغییرات ضریب شکست را نیز می‌توان از رابطه‌ی زیر بدست آورد.

$$\delta(\Delta n) = \sqrt{\left(\frac{m}{d}\delta\lambda\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{d}\delta m\right)^2 + \left(\frac{m\lambda}{d^2}\delta d\right)^2} \quad (۵)$$

علاوه بر این دقت اندازه‌گیری به علت محدودیت‌های دیگر آماده‌سازی نمونه از جمله انحراف شکل سطح از حالت تخت، نیز کاهش می‌یابد. انحراف شکل سطح برش داده شده از حالت مسطح به حالت گوه‌ای شکل در

۴. برازش فریزهای دایروی به معادله چند جمله‌ای در ابتدا، از روی الگوی تداخلی شکل هر فریز نیمه دایروی به صورت معادله دایره زیر برازش می‌گردد.

$$z^2 + r^2 = (a(m))^2, \forall m = 1, 2, \dots, N_f \quad (8)$$

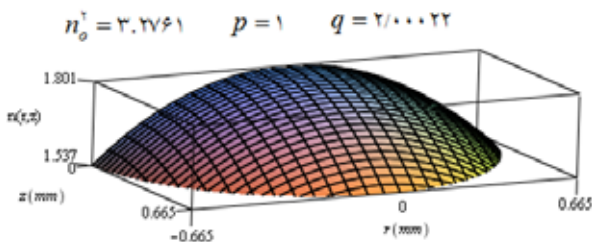
که N_f تعداد فریزهای الگوی تداخلی است و $a(m)$ شعاع هر فریز در مرتبه m را نشان می‌دهد. در گام بعدی چون بنابه رابطه‌ی ۶ و ۸ ضریب شکست میکرو عدسی تخت و شعاع فریزها تابعی از مرتبه‌ی فریز می‌باشند. پس می‌توانیم بین ضریب شکست n_m و شعاع فریزها a_m رابطه‌ای بصورت زیر از روی توابع برازش شده، بنویسیم.

$$\ln(n_0^2 + n^2) = \ln q + p \ln(a_m^2) \quad (9)$$

که n_0 و q و p ضرایب برازش هستند (n_0 بیشینه ضریب شکست بدست آمده بعد از نفوذ را نشان می‌دهد). نهایتاً ضریب شکست با جایگذاری معادله ۸ در معادله ۹ به شکل تابعی از مختصات r و z به دست می‌آید.

$$n^2 = n_0^2 - q(z^2 + r^2)^p \quad (10)$$

شکل ۴ برازش معادله ۹ همراه با مقادیر ضرایب است که تنها سه ضریب برای بهترین برازش نهایی نیاز است.

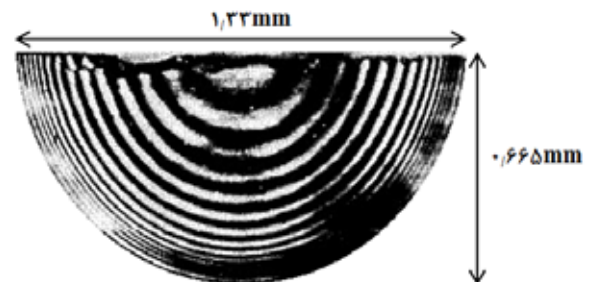


شکل ۴: نمایش نمایه ضریب شکست میکرو عدسی تخت با مقایسه نمایه ضریب شکست نتیجه شده و نمایه ارائه شده در مرجع [۱۱] می‌توان پی به توافق خوب بین آنها برد. از اینرو با به دست آوردن رابطه‌ی بین ضرایب برازش و شرایط ساخت می‌توان عوامل موثر در ساخت میکرو عدسی را کنترل کرد.

این اقدامات کمک می‌کند تا فرایند ساخت را بتوان بهینه نمود و در نهایت به شکل نمایه ضریب شکست دلخواه رسید.

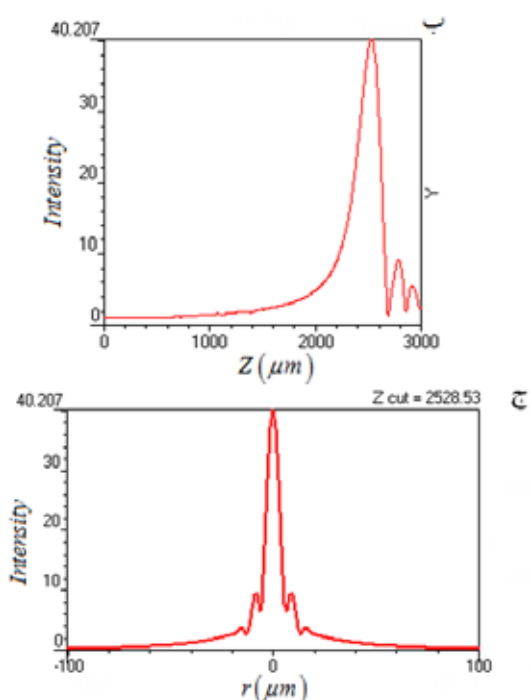
۳. نتایج آزمایشگاهی

در این مقاله ما از مشخصات میکرو عدسی تخت ارائه شده در مرجع [۱۱] با قطر دهانه‌ی ۱٫۳۳ میلی‌متر استفاده کرده‌ایم. این میکرو عدسی تخت توسط نفوذ یون‌های قلیایی تک ظرفیتی با اعمال میدان الکتریکی در بستر شیشه سیلیکات ساخته شده است. الگوی تداخلی این میکرو عدسی در شکل ۳ نشان داده شده است. در مرجع [۱۱] نمایه ضریب شکست تدریجی میکرو عدسی تخت توسط روش تداخل برشی اندازه‌گیری شده است. اما در اینجا از روی الگوی تداخلی با روشی ساده نمایه ضریب شکست تدریجی را اندازه‌گیری شده است. فاصله کانونی و قطر پرتوی کانونی شده را توسط شبیه‌سازی انتشار پرتوی گاوسی در نرم افزار optiwave به دست آورده‌ایم.



شکل ۳: الگوی تداخلی میکرو عدسی تخت بدست آمده توسط تداخل سنج برشی کلی [۱۱]

الگوی تداخلی شامل ۲۷ فریز نیمه دایروی است. ضریب شکست بستر $n_s = 1/537$ و طول موج استفاده شده در اندازه‌گیری‌های تداخل سنجی $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ و ضخامت PML برابر $d = 60 \mu\text{m}$ می‌باشد [۱۱].



شکل ۵. الف. توزیع دو بعدی شدت پرتوی گاوسی در محیط میکروعدسی تخت، ب. شدت یک بعدی پرتوی گاوسی شبیه سازی شده در راستای محور نوری و در $r=0$ ، ج. شدت یک بعدی پرتوی گاوسی شبیه سازی شده در نقطه‌ی کانونی.

۵. نتیجه گیری

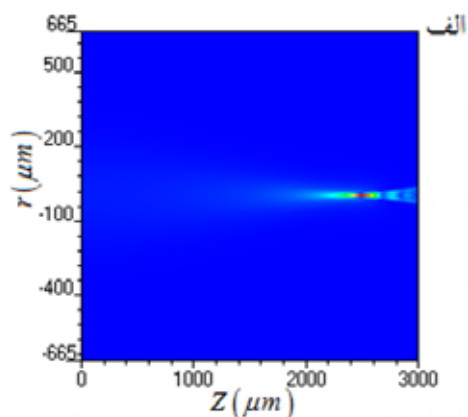
با توجه به اینکه ایجاد تغییر ضریب شکست در شیشه‌ها توسط تبادل یونی انجام می‌شود و در این روش حداکثر تغییرات ضریب شکست در حدود ۰/۲۷ است. لذا ساخت میکروعدسی‌ها با فاصله کانونی کمتر مشکل و در برخی مواقع غیرعملی است اما با ترکیب دو میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی می‌توان فاصله کانونی و حتی پهنای باریکه نوری را کم کرد. به کمک شبیه‌سازی می‌توان به راحتی فاصله کانونی و پهنای پرتو گاوسی را بدست آورد. در این شبیه‌سازی نشان دادیم که با ترکیب دو میکروعدسی با نمایه ضریب شکست تدریجی یکسان فاصله کانونی از $7,283\text{mm}$ به $1,377\text{mm}$ و پهنای پرتوی گاوسی از $32,88\mu\text{m}$ به $17,34\mu\text{m}$ تغییر می‌کند.

از معادله ۱۰ می‌توان به سادگی عمق میکروعدسی تخت Z_{\max} و شعاع دهانه r_{\max} بعد از نفوذ را بر حسب ضرایب برازش بصورت زیر معین کرد.

$$Z_{\max} = 2q \sqrt{\frac{n_o^2 - n^2}{p}} \quad (11)$$

$$r_{\max} = 2q \sqrt{\frac{n_o^2 - n^2}{p}} \quad (12)$$

بنابراین ضرایب برازش تقریباً وابسته به شکل عدسی هستند. در ادامه تجزیه و تحلیل برای اینکه نشان دهیم می‌توان این معادله برازش شده را به عنوان نمایه ضریب شکست میکروعدسی تخت استفاده کرد برخی خواص نوری میکروعدسی را بررسی می‌کنیم. به این منظور انتشار باریکه گاوسی از لیزری با نیم پهنای $200\mu\text{m}$ میکرون در میکروعدسی با نمایه ضریب شکست تدریجی به دست آمده را با نرم افزار Optiwave شبیه‌سازی کردیم که در شکل ۵ - الف توزیع دو بعدی شدت پرتوی گاوسی در محیط میکروعدسی تخت و در شکل ۵ - ب شدت یک بعدی پرتوی گاوسی شبیه‌سازی شده در راستای محور نوری و در شکل ۵ - ج توزیع یک بعدی شدت پرتو گاوسی در نقطه‌ی کانون آورده شده است. فاصله‌ی کانونی و پهنای باریکه‌ی کانونی شده حاصل از شبیه‌سازی بترتیب برابر با $2528\mu\text{m}$ و $7/42\mu\text{m}$ و در مرجع [۱۱] فاصله‌ی کانونی $2479\mu\text{m}$ است. بنابراین توافق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی بدست آمد.



مرجع‌ها

- [1] Zhu X. F., Iga K., "Index profile of a planar microlens by ion exchange/diffusion", *Applied optics*, Vol. 25, No. 19, Oct. 1986, pp. 3397-3400.
- [2] Furukawa R. A., Tagaya A., Koike Y., "Differential mode analysis of a polarization-maintaining graded-index plastic optical fiber using macrobending", *The Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 48, no. 2R, Feb. 2009, pp. 022503.
- [3] Nylk J., Kristensen M. V. G., Mazilu M., Thayil A. K., Mitchell C. A., Campbell E. C., Powis S. J., Gunn-Moore F. J., Dholakia K. "Development of a graded index microlens based fiber optical trap and its characterization using principal component analysis", *Biomedical optics express*, Vol. 6, No. 4, 2015, PP. 1512-1519.
- [4] Arrue J., Jiménez F., Aldabaldetrekú G., Durana G., Zubia J., Lomer M., Mateo J., "Analysis of the use of tapered graded-index polymer optical fibers for refractive-index sensors", *Optics express*, Vol. 16, No. 21, Oct. 2008, pp. 16616-16631.
- [5] Kaminow I. P., Carruthers J. R., "Optical waveguiding layers in LiNbO₃ and LiTaO₃", *Applied Physics Letters*, Vol. 22, No. 7, Apr. 1973, pp. 326-328.
- [6] Young M. ., "Optical fiber index profiles by the refracted-ray method (refracted near-field scanning)", *Applied optics*, Vol. 20, No. 19, Oct. 1981, pp. 3415-3422.
- [7] Ikeda M., Tateda M., Yoshikiyo H., "Refractive index profile of a graded index fiber: measurement by a reflection method", *Applied optics*, Vol. 14, No. 4, Apr. 1975, pp. 814-815.
- [8] Sun X., Ma H., Ming H., Zheng Z., Yang J., Xie J., "The measurement of refractive index profile and aberration of radial gradient index lens by using imaging method", *Optics & Laser Technology*, Vol. 36, No. 2, Mar. 2004, pp. 163-166.
- [9] Sladen F. M. E., Payne D. N., Adams M. J., "Determination of optical fiber refractive index profiles by a near-field scanning technique", *Applied Physics Letters*, Vol. 28, No. 5, Mar. 1976, pp. 255-258.
- [10] Kokubun Y., Iga K., "Index profiling of distributed-index lenses by a shearing interference method" *Applied optics*, Vol. 21, No. 6, Mar. 1982, pp. 1030-1034.
- [11] Iga K., Misawa S., "Distributed-index planar microlens and stacked planar optics: a review of progress", *Applied optics*, Vol. 25, No. 19, Oct. 1986, pp. 3388-3396.