

## شبیه‌سازی انتشار پرتو گاوسی در دو میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی جفت شده

مسعود کاوش تهرانی، رامین توفیق موالو<sup>۱</sup>

**چکیده:** در این مقاله شبیه‌سازی‌هایی برای انتشار پرتو گاوسی در میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی و دو میکروعدسی تخت جفت شده با ضریب شکست تدریجی ارائه شده‌اند. ابتدا انتشار پرتو گاوسی در یک میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی به قطر دهانه‌ی  $980\ \mu\text{m}$  و عمق نفوذ  $400\ \mu\text{m}$  و طول بستر  $5\text{mm}$  توسط نرم افزار Optiwave شبیه‌سازی می‌شود؛ سپس شبیه‌سازی برای دو میکروعدسی تخت جفت شده با ضریب شکست تدریجی انجام می‌شود. با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی، فاصله‌ی کانونی و پهنای پرتو در نقطه‌ی کانونی به دست آورده می‌شود. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که فاصله‌ی کانونی و پهنای پرتو در نقطه‌ی کانونی برای دو میکروعدسی تخت جفت شده با ضریب شکست تدریجی نسبت به میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی کوچک‌تر هستند.

**واژه‌های کلیدی:** انتشار پرتوی گاوسی، میکروعدسی، ضریب شکست تدریجی، فاصله کانونی، پهنای پرتو

## Simulating Propagation of Gaussian Beam Instacked Graded-Index Planar Microlens

M. Kavosh Tehrani, R. Tofigh Movalu<sup>1</sup>

**Abstract:** In this paper, the simulations for propagation of Gaussian beam in graded-index planar microlens and stacked graded-index planar microlens are presented. At first, the propagation of Gaussian beam on the distributed-index planar microlens structure with depth of distributed-index region  $400\ \mu\text{m}$  and diameter of  $980\ \mu\text{m}$  and substrate length  $5\text{mm}$  is simulated by Optiwave software. Then, simulation is performed for the stacked graded-index planar microlens. By using simulation data, the focal length and beam width in focal point are obtained. Simulations show that the focal length and beam width in focal point decreases for stacked graded-index planar microlens are smaller compare to their values for graded-index planar microlens.

<sup>۱</sup> پژوهشکده علوم و فناوری اپتیک و لیزر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر

## ۱. مقدمه

میکروعدسی‌های تخت با توزیع سه بعدی نمایه ضریب شکست توسط فرآیند تبادل یونی ساخته می‌شود. انتخاب روش تبادل یونی به علت سادگی و انعطاف‌پذیری در انتخاب دهانه عددی و ابعاد شیشه است. در فرآیند تبادل یونی یک تکه شیشه لیتوگرافی شده در حمام نمک مذاب برای مدت زمان و دمای معین فرو برده می‌شود. عوامل موثر همچون شدت میدان الکتریکی قویتر، افزایش دما، افزایش زمان نفوذ، اندازه یون نفوذ کننده با ابعاد کوچکتر، آرایش ناخالصی کمتر باعث افزایش سرعت مبادله یونی می‌شود. در این روش علت تغییر ضریب شکست تغییرات شیمیایی در ساختار و اندازه شعاع یونی و قطبش‌پذیری الکترونی است. ویژگی‌های این نوع میکروعدسی‌های تدریجی ساخته شده، داشتن سطوح مسطح، ابیراهی کمتر نسبت به عدسی‌های معمولی، مشخصه‌ی زاویه‌ای، فاصله کانونی و دهانه عددی مناسب و هم‌محوری و نصب راحت است. به همین دلیل به طور گسترده در سامانه‌های مخابرات نوری همچون سامانه‌های پردازش اطلاعات و تصویربرداری بکار می‌روند [۱-۳]. بنابراین نیاز به توسعه این نوع از عناصر میکرواپتیکی در دستگاه‌های مختلف وجود دارد. در مقالات بسیاری روش‌های ساخت [۴-۶] و محاسبه نمایه ضریب شکست [۷-۹] و انتشار پرتو در محیط با ضریب شکست تدریجی [۱۰-۱۱] بررسی شده است. در مقالات به ندرت به مرتبط کردن مدل نفوذ به یک برنامه طراحی میکروعدسی تدریجی اشاره شده است. بطوریکه بتوان پارامترهای تجربی همچون دما و زمان را بطور مستقیم در طول فرآیند طراحی عدسی بهینه‌سازی کرد. این کار اجازه تعیین شرایط آزمایشگاهی مناسب و مورد نیاز برای ایجاد شکل نمایه ضریب شکست را به طراح می‌دهد که دارای عملکرد نوری مطلوب باشد. به علاوه این روش تضمین می‌کند که عدسی‌هایی با ضریب شکست تدریجی طراحی شده با مدل نفوذ را می‌توان با استفاده از تکنولوژی‌های کنونی ساخت. برای اتصالات نوری در سامانه‌های مخابرات نوری از دو میکروعدسی تخت جفت شده با

ضریب شکست تدریجی استفاده می‌شود. به همین خاطر برای آگاهی از چگونگی عملکرد دو میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی جفت شده و چگونگی انتشار باریکه نوری در آن باید از راه‌های مختلفی همچون شبیه‌سازی بهره برد.

در این کار انتشار پرتو گاوسی از میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی و دو میکروعدسی تخت جفت شده با ضریب شکست تدریجی توسط نرم افزار Optiwave شبیه‌سازی شده است و فاصله‌ی کانونی و پهنای پرتو در کانون با استفاده از شبیه‌سازی‌ها، محاسبه و مقایسه گردیده است.

## ۲. مدل نمایه ضریب شکست

امروزه ضریب شکست تدریجی یک مزیت بزرگ محسوب می‌شود. هر چند حداکثر تغییرات ضریب شکست به مقادیری کمتر از ۰٫۲۷ محدود می‌شود. تغییر ضریب شکست در بستر مورد استفاده در این مقاله نتیجه ترکیب دو اثر مهم زیر است.

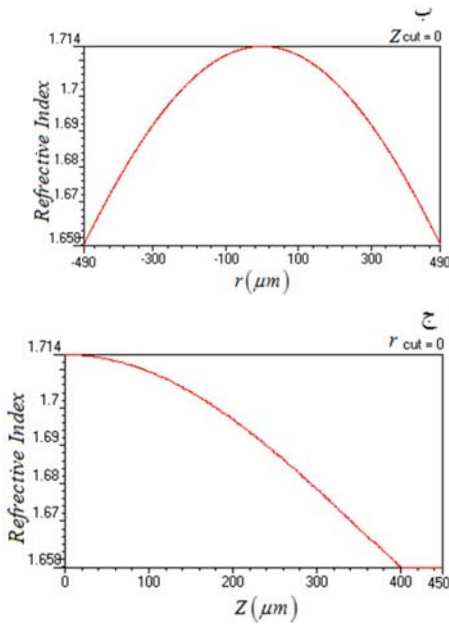
۱. اندازه اتمی یون‌های مبادله شده:

اگر یک یون کوچک (مانند  $Li^+$  در نمک مذاب) جایگزین یون بزرگ ( $Na^+$  یا  $K^+$  در شیشه) شود شبکه شیشه در اطراف یون کوچکتر برای تولید یک ساختار بسته‌ای متراکم فرو می‌پاشد که در نتیجه آن ساختار دارای ضریب شکست بزرگتر می‌شود و بر عکس اگر یون بزرگتر جایگزین یک یون کوچکتر شود بستر با کاهش ضریب شکست مواجه خواهد شد.

۲. قطبش‌پذیری الکتریکی یون‌های مبادله شده:

اگر یون با قطبش‌پذیری الکتریکی بزرگتر همچون  $Ag^+$ ،  $CS^+$ ،  $Tl^+$  و  $Rb^+$  یا  $K^+$  جایگزین یک یون با قطبش-پذیری کمتر همچون  $Na^+$  شود. ضریب شکست افزایش می‌یابد و برعکس.

در این شبیه‌سازی، از میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی ارائه شده توسط شرکت Nippon Sheet Glass (NSG) با نمایه ضریب شکست شبه-کروی اندازه‌گیری به روش میکروسکوپ تداخلی استفاده کرده‌ایم که رابطه‌ی آن عبارت است از [۱۲]:



شکل ۲. تغییرات نمایه ضریب شکست میکروعدسی تخت الف. نمایه دو بعدی، ب. تغییرات ضریب شکست بر حسب مختصه شعاع (r) در z=0، ج. تغییرات ضریب شکست بر حسب مختصه محور نوری (Z) میکرو عدسی در r=0.

### ۳. اپتیک دو میکروعدسی تخت جفت شده با ضریب شکست تدریجی

دو میکروعدسی تخت جفت شده با ضریب شکست تدریجی، نمایش داده شده در شکل ۳، آرایه‌ای از موجبر دو بعدی است که شامل دو میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی است. این دو میکروعدسی تخت جفت شده، در تسهیم‌کننده‌های نوری، اتصالات نوری، جفت‌کننده‌های جهت‌دار و غیره کاربرد دارد و می‌توانند با استفاده از یک ساختار دو بعدی تغییرات ضریب شکست ساخته شوند. اگر از یک آرایه دو بعدی از حفره‌ها جهت نگهداری فیبر نوری استفاده کنیم، می‌توانیم به راحتی فیبر نوری را با آرایه‌ای از این دو میکروعدسی‌های جفت شده، مطابق شکل ۴، هم محور نمائیم. ساختارهای اپتیکی از قبیل آینه‌های نیم بازتابنده و فیلترهای چند لایه دی الکتریک به آسانی می‌توانند به یک میکروعدسی جفت شده اضافه شوند [۱۳-۱۵].

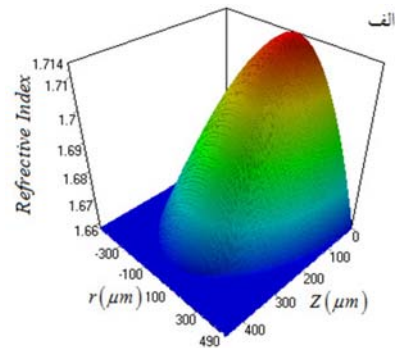
$$n(r,z)^2 = n_0^2 \left[ 1, (gz)^2, (gz)^4, (gz)^6 \right] \times \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1.5 & -1.3 \\ -1.8 & 15.4 & -46.6 & 37.8 \\ 10.4 & -127.4 & 375.8 & -286.2 \\ -24 & 298.2 & -859.1 & 612.4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ (gr)^2 \\ (gr)^4 \\ (gr)^6 \end{bmatrix} \quad (1)$$

که  $n_0 = 1/714$  ضریب شکست در مرکز دهانه‌ی و روی سطح عدسی است.  $g = 0.545 \text{ mm}^{-1}$  (برای طول موج  $1550 \mu\text{m}$ ) یک ثابت بهنجار شده است که تعیین کننده توان عدسی است.  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  شعاع دهانه میکروعدسی و Z محور نوری میکروعدسی را نشان می‌دهد. شکل ۱ شماتیکی از میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی را نشان می‌دهد که در آن ضریب شکست بستر  $1/658$  و بیشینه تغییر ضریب شکست این عدسی  $0.056$  است.



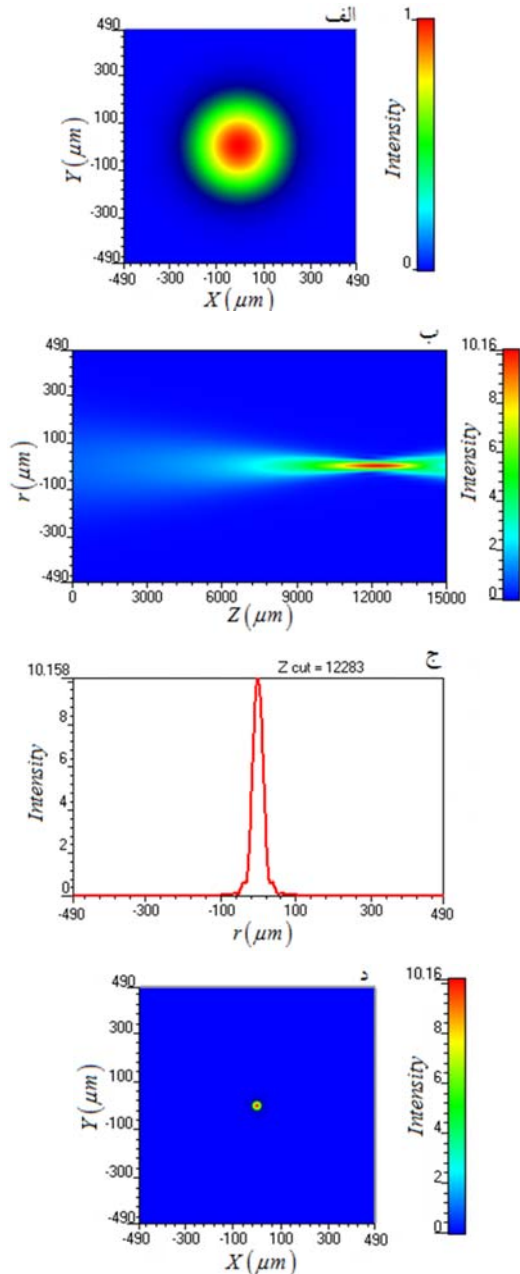
شکل ۱. مشخصات ابعاد میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی

نمودارهای دو بعدی و سه بعدی مربوط به ضریب شکست آورده شده در رابطه‌ی ۱ (برای میکروعدسی تخت با توزیع ضریب شکست تدریجی شبه کره‌ای) در شکل‌های ۲-ا و ۲-ب و ۲-ج رسم شده است.

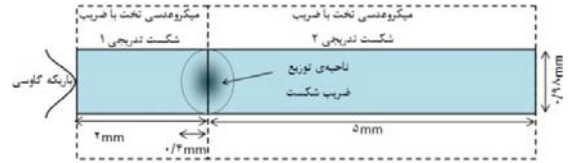


بنابراین پهنای باریکه پرتو  $32,88 \mu\text{m}$  است که قابلیت استفاده این عدسی در فیبرهای نوری را نشان می‌دهد. شکل ۵-د توزیع دو بعدی شدت پرتو گاوسی در نقطه‌ی

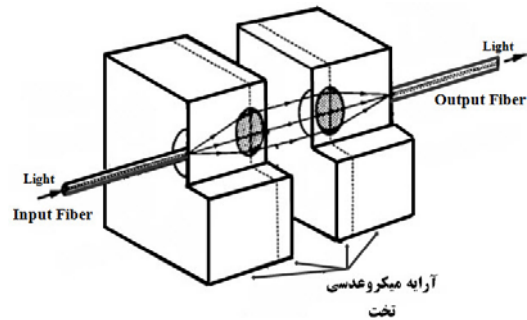
کانون با بیشینه شدت  $\frac{w}{m^2}$  را نشان می‌دهد.



شکل ۵. الف. توزیع شدت پرتوی گاوسی ورودی به میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی در سطح مقطع  $XY$ . ب. توزیع دو بعدی شدت پرتوی گاوسی در تمام ناحیه‌ی شبیه‌سازی شده. ج. شدت یک بعدی پرتوی گاوسی



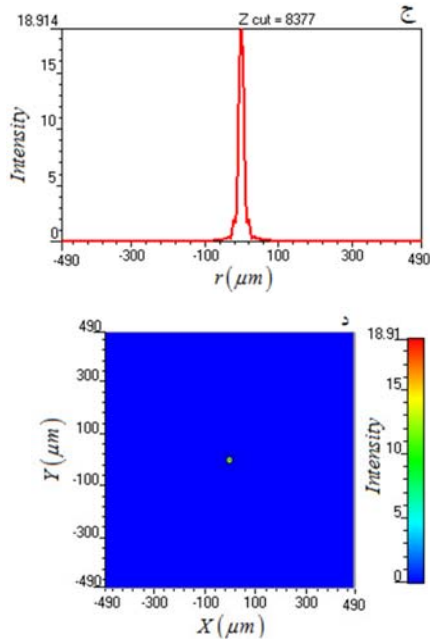
شکل ۳. مشخصات ابعادی و نحوه‌ی قرارگیری دو میکروعدسی با ضریب شکست تدریجی جفت شده.



شکل ۴. ساختاری از اتصال فیبر به فیبر توسط میکروعدسی‌های تخت جفت شده با ضریب شکست تدریجی

#### ۴. شبیه‌سازی انتشار پرتوی گاوسی در میکروعدسی

این شبیه‌سازی‌ها برای شیشه‌های نوری با تغییرات ضریب شکست مطابق رابطه‌ی (۱) انجام شده است. مطابق شکل ۱ این شیشه سطح مقطع  $0,98\text{mm} \times 0,98\text{mm}$  و طول بستر  $5\text{mm}$  و  $2\text{mm}$  دارد. ناحیه‌ی توزیع ضریب شکست شبه کروی این شیشه دارای دهانه‌ی به قطر  $980 \mu\text{m}$  و بیشینه عمق نفوذ  $400 \mu\text{m}$  است و محیط اطراف هوا در نظر گرفته شده است. شکل ۵-آ توزیع شدت پرتو گاوسی ورودی به میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی با نیم پهنای  $200 \mu\text{m}$  و بیشینه شدت  $\frac{w}{m^2}$  و شکل ۵-ب توزیع شدت پرتو گاوسی پس عبور از طریق این عدسی را نشان می‌دهد. با استفاده از این شکل می‌توان فاصله‌ی کانونی را بدست آورد با توجه به اینکه طول بستر  $5\text{mm}$  و بیشترین شدت در  $12,283\text{mm}$  است؛ از اینرو فاصله‌ی کانونی پشتی میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی  $7,283\text{mm}$  بدست می‌آید. با استفاده از نمودار توزیع شدت شعاعی در نقطه کانونی ( $Z=12,283\text{mm}$ )، شکل ۵-ج، می‌توان پهنای پرتو گاوسی را تعیین کرد



شکل ۶الف. توزیع شدت پرتوی گاوسی ورودی به دو میکروعدسی تخت جفت شده با ضریب شکست تدریجی در سطح مقطع  $XY$ . ب. توزیع دو بعدی شدت پرتوی گاوسی در تمام ناحیه‌ی شبیه‌سازی شده، ج. شدت یک بعدی پرتوی گاوسی شبیه‌سازی شده در نقطه‌ی کانونی، د. توزیع شدت پرتوی گاوسی کانونی شده با دو میکروعدسی تخت جفت شده با ضریب شکست تدریجی در سطح مقطع  $XY$ .

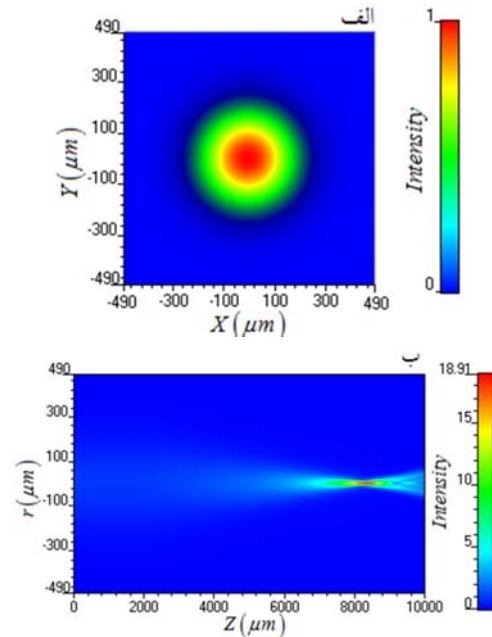
### ۵. نتیجه گیری

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  $0.27$  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. بطوریکه کاهش پهنای پرتوی گاوسی قابلیت

شبیه‌سازی شده در نقطه‌ی کانونی، د. توزیع شدت پرتوی گاوسی کانونی شده با میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی در سطح مقطع  $XY$

در شبیه‌سازی بعدی، همان پرتو گاوسی از دو میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی جفت شده، عبور داده شده است. مشابه شبیه‌سازی قبلی، توزیع‌های یک بعدی و دو بعدی پرتو، هنگام عبور و پس از عبور از دو میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی جفت شده و در نقطه کانونی، در شکل‌های ۵ (آ، ب، ج، د) نشان داده شده است. بر طبق این شکل‌ها، فاصله‌ی کانونی پشتی و پهنای باریکه‌ی پرتو بترتیب  $1.377\text{mm}$  و  $17.34\mu\text{m}$  بدست می‌آید.

شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند با استفاده دو میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی جفت شده می‌توان فاصله‌ی کانونی و پهنای پرتو را نسبت به یک میکروعدسی تخت با ضریب شکست تدریجی کاهش داد.



by utilizing planar gradient-index lenses and silicon-V grooves", *Applied optics*, Vol. 36, No. 20, Jul. 1997, pp. 4736-4743.

[15] Iga K., Oikawa M., Misawa S., Banno J., Kokubun Y. "Stacked planar optics: an application of the planar microlens", *Applied optics*, Vol. 21, No. 19, Oct 1982, pp 3456-3460.

استفاده از دو میکروعدسی تدریجی جفت شده در فیبرهای نوری تک مد را افزایش می دهد.

## مرجع ها

[1] Hernandez-Serrano A. I., Weidenbach M., Busch S. F., Koch M., Castro-Camus E., "Fabrication of gradient-refractive-index lenses for terahertz applications by three-dimensional printing", *Journal of the Optical Society of America B*, Vol. 33, No. 5, May. 2016, pp. 928-931.

[2] Li S., Sun Y., Zhu J., Tang T., "Monte Carlo simulation for coupling between single-mode fiber and slab waveguide with spherical fiber microlenses", *Optical Engineering*, Vol. 50, No. 11, May. 2011, pp. 115001-115001.

[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] Oikawa M., Iga K., Sanada T., Yamamoto N., Nishizawa K., "Array of distributed-index planar micro-lenses prepared from ion exchange technique", *Japanese journal of applied physics*, Vol. 20, No. 4, Apr. 1981, p. L296.

[5] Oikawa M., Iga K., Morinaga M., Usui, T., Chiba T., "Distributed-index formation process in a planar microlens", *Applied optics*, Vol. 23, No. 11, Jun. 1984, pp. 1787-1789.

[6] 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.

[7] 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.

[8] Singer W., Dobler B., Schreiber H., Brenner K. H., Messerschmidt B. "Refractive-index measurement of gradient-index microlenses by diffraction tomography", *Applied optics*, Vol. 35, No. 13, 1996, pp.2167-2171.

[9] 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.

[10] Horiuchi S., Yoshida S., Yamamoto M., "Numerical ray tracing method for an eccentric radial gradient-index rod lens", *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 31, No. 10, 2014, pp. 2131-2134.

[11] Morgan K. L., Brocker D. E., Campbell S. D., Werner D. H., Werner P. L. "Transformation-optics-inspired anti-reflective coating design for gradient index lenses", *Optics letters*, Vol. 40, No. 11, Jul. 2015, pp. 2521-2524.

[12] 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.

[13] Bähr J., Brenner K. H., "Realization and optimization of planar refracting microlenses by Ag-Na ion-exchange techniques", *Applied optics*, Vol. 35, No. 25, Sep. 1996, pp. 5102-5107.

[14] Moisel J., Passon C., Bähr J., Brenner K. H., "Homogenous concept for the coupling of active and passive single-mode devices