



دانشگاه شهید باهنر کرمان

دانشکده‌ی علوم - بخش فیزیک

پایان‌نامه‌ی تحصیلی برای دریافت درجه‌ی کارشناسی ارشد

فوتونیک

تحت عنوان

بررسی ریزکاواک‌های اپتیکی پدید آمده

در سیستم‌های MF-S و PF-S

استاد راهنما:

دکتر حسن فاطمی

مؤلف:

امیر قطمیری

(ب)

روح پدر عزیزم

که چه زود وجود پر مهر و محبتش را از دست دادم

و

مادر مهربانم

که بدلیل بودنش در کنارم همواره خداوند بزرگ را

سپاسگزارم

خداوند بزرگ را سپاسگزارم که نعمت داشتن مادری سرشار از صمیمیت و مهربانی و برادر و خواهری که همواره به آنها افتخار خواهم کرد را نصیب من کرده است. با آنکه در انتهای این دوره از تحصیلاتم وجود مهربان و دلگرم کننده پدرم را از دست دادم ولی یاد و خاطره و اندرزهایش همچون چراغی روشن، راهنمای مسیر زندگیم خواهد بود.

از خانواده ام که بی هیچ چشمداشتی مرا پشتیبانی کردند سپاسگزاری می نمایم. از استاد گرانقدر خویش، جناب آقای دکتر حسن فاطمی، که در طول دوره کارشناسی ارشد، مطالب و موضوعات مهم علمی را به بنده آموختند و نظارت مستمری بر فعالیت های اینجانب داشتند، کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم و از خداوند متعال برای ایشان سلامتی و شادکامی آرزومندم. در پایان از جناب آقای نجیب زاده مسئول کارگاه فیزیک، آقای عباس خاکسار، دوست و همکارم در آزمایشگاه میکرواپتیک و تمامی دوستان و اطرافیانم که در این مدت به بنده کمک نمودند، تشکر و قدردانی می نمایم و برایشان آرزوی بهترینها را دارم.

چکیده

اصول کارکرد میکروسکوپهای تداخل سنجی فیبرنوری، بر اساس پدیده درهمروی در ریزکاواک های اپتیکی پدید آمده بین نوک کاوشگر فیبرنوری تک حالت و سطح نمونه مورد بررسی، می باشد. این ریزکاواک های اپتیکی در فضای بین نوک تخت کاوشگر فیبرنوری و سطح نمونه (ریزکاواک اپتیکی و یا سیستم ریزدرهمروی سنج PF-S) و یا بین کاوشگر فیبرنوری نوک ریزعدسی دار و سطح نمونه (ریزکاواک اپتیکی و یا سیستم ریزدرهمروی سنج MF-S) تشکیل می شوند. در این پایان نامه، عملکرد ریزکاواک های اپتیکی پدید آمده در سیستم های PF-S و MF-S، از لحاظ نظری و همچنین عملی، مورد بررسی قرار گرفته اند. در موارد نظری، نخست، با استفاده از دو مدل پیرامحوری و مدل جامع (و یا غیر پیرامحوری)، ویژگیهای اپتیکی کاوشگرهای فیبرنوری نوک ریزعدسی دار مورد استفاده در این سیستم ها مورد مطالعه قرار گرفته اند. نتایج بدست آمده از به کارگیری این دو مدل، بیانگر نکات قابل توجهی می باشد که به آنها پرداخته شده است. سپس، الگوی در همروی در ریزکاواک های اپتیکی PF-S و MF-S بدست آورده شده اند. در بررسی عملی، نخست، به بیان روشهای ساخت کاوشگرهای فیبرنوری نوک ریزعدسی دار پرداخته شده است. سپس، یک سیستم ریزدرهمروی سنجی فیبرنوری، طراحی و به کار گرفته شده است. نتایج عملی بدست آمده از این سیستم، تأیید کننده نتایج بدست آمده از بررسی های نظری است. در این رابطه، برای برطرف نمودن برخی عیوب ذاتی دستگاه پیمایشگر مورد استفاده در این آزمایشها، یک برنامه کامپیوتری نوشته شد.

۱	۱- مقدمه
۶	۲- بررسی نظری ریز کاواک های اپتیکی MF-S و PF-S
۷	۱-۲- معادله موج در یک فیبر نوری تک حالت با نمار شکست پله ای
۱۴	۲-۲- ریز کاواک های اپتیکی MF-S و PF-S
۱۴	۱-۲-۲- تشکیل فریزهای درهمروی در ریز کاواک اپتیکی PF-S
۱۹	۲-۲-۲- تشکیل فریزهای درهمروی در ریز کاواک اپتیکی MF-S
۲۲	۳-۲- بررسی نظری ریز عدسی نوک کاوشگر فیبرنوری
۳۱	۱-۳-۲- مدل پیرامحوری برای بررسی ریز عدسی نوک کاوشگر
۳۳	۲-۳-۲- مدل جامع برای بررسی ریز عدسی نوک کاوشگر
	۳- بررسی عملی سیستم های درهمروی سنجی در ریز کاواک های اپتیکی PF-S و MF-S
۴۲	۱-۳- اجزای سیستم ریز درهمروی سنجی فیبرنوری
۴۴	۱-۱-۳- لیزر و جفت کننده نور آن به درون فیبر نوری
۴۵	۲-۱-۳- ریز پیمایشگر پیزوالکتریکی با کنترل کامپیوتری
۴۸	۳-۱-۳- نمونه بازتابشگر
۵۰	

۵۱	۳-۱-۴- سیستم آشکارساز نوری
۵۳	۳-۱-۵- پیگیری میکروسکوپی همزمان فرایند پیمایش
۵۳	۳-۲- چگونگی انجام فرایند پیمایش و تشکیل فریزهای درهمروی در ریز کاواک
۵۴	۳-۲-۱- تشکیل فریزهای درهمروی در ریز کاواک اپتیکی PF-S
۵۶	۳-۲-۲- خطی نمودن پیمایش در پیمایشگر پیزوالکتریکی
۶۳	۳-۲-۳- تشکیل فریزهای درهمروی در ریز کاواک اپتیکی MF-S
۶۵	۳-۳- ساخت کاوشگر فیبرنوری نوک ریز عدسی دار
۶۶	۳-۳-۱- روش استفاده از سیستم گرما-کششی جرقه ای با کنترل کامپیوتری
۶۷	۳-۳-۲- روش استفاده از اپوکسی
۷۱	۴- نتیجه گیری
	۴-۱- مقایسه نتایج نظری و عملی فریزهای درهمروی در ریز کاواک های اپتیکی PF-S و MF-S
۷۲	
۷۳	۴-۲- نتایج حاصل از مدل پیرامحوری
۷۶	۴-۳- نتایج حاصل از مدل جامع
۸۴	۵- برداشت کلی
۸۷	پیوست

٩٠

مراجع

٩٥

Abstract

فصل ١

مقدمه

میکروسکوپهای درهمروی سنجی فیبر نوری^۱ (OFIM) [۳ و ۲]، که زیر مجموعه‌ای از میکروسکوپهای کاوشگر روبشی (SPMs)^۲ [۴] هستند، داده‌های با ارزشی از توپوگرافی و ویژگیهای اسپکتروسکوپی سطح نمونه مورد بررسی در اختیار ما قرار می‌دهند. این میکروسکوپها، به یک کاوشگر فیبرنوری^۳ مناسب، برای بالابردن کیفیت اندازه‌گیری، مجهز می‌باشند [۵ و ۶]. کاوشگرهای فوق، به عنوان چشمه و/یا کاوشگری که داده‌ها را از سطح نمونه جمع‌آوری می‌کند، نقش مهمی ایفا می‌نمایند [۷]. همچنین بدلیل سبک و کوچک بودنشان، می‌توانند بدون تغییر بر ویژگیهای سطح نمونه مورد بررسی، داده‌های مورد نیاز را جمع‌آوری کنند. این عدم ایجاد تغییر بر روی سطح نمونه، دلیل برتری میکروسکوپهای فوق بر میکروسکوپهای الکترونی می‌باشد.

نوک فیبرنوری در فاصله‌ای حدود چند میکرومتر از سطح نمونه به جاروب (ویا روبش) درآورده می‌شود. فضای ایجاد شده بین نوک کاوشگر فیبرنوری و سطح نمونه مورد بررسی، یک ریزکاواک اپتیکی^۴ [۸] را پدید می‌آورد. عملاً، نوک کاوشگر فیبرنوری و سطح نمونه تحت بررسی، به عنوان دو صفحه ریزکاواک خارجی [۹ و ۱۰] فابری – پرو رفتار می‌کنند. بخشی از نور منتشرشده درون فیبر، با برخورد به سطح نوک فیبر، به درون آن بازگشته و بخشی دیگر از نوک فیبر گذر کرده و بازتاب‌های پی در پی

¹ Optical Fiber Interferometry Microscopy

² Scanning Probe Microscopes

³ Optical Fiber Probe

⁴ Optical Microcavity

در محیط بین نوک فیبر و سطح نمونه انجام می دهد. بخش هایی از این بازتابشهای پی در پی به فیبر کاوشگر جفت می شوند. پرتوهای جفت شده به فیبر کاوشگر و پرتوی بازتابشی از نوک آن، با یکدیگر تداخل کرده و با تغییر فاصله بین نوک فیبر و سطح نمونه، ایجاد فریزهای درهمروی در سر دیگر فیبر کاوشگر می کنند. بدین ترتیب یک سیستم ریزدرهمروی سنجی پدید می آید. در این پایان نامه، این سیستم های ریزدرهمروی سنجی، در دو گونه متفاوت ریزکاواک اپتیکی (ویا سیستم ریزدرهمروی سنجی) $PF-S^1$ و $MF-S^2$ معرفی و ویژگیهای آنها بررسی می شوند. در سیستم ریزدرهمروی سنج $PF-S$ ، یک ریزکاواک اپتیکی بین نوک تخت کاوشگر فیبرنوری و سطح نمونه ایجاد می شود [۱۱]. در حالی که در سیستم ریزدرهمروی سنج $MF-S$ ، فضای بین ریزعدسی نوک کاوشگر فیبرنوری و سطح نمونه، این ریزکاواک اپتیکی را پدید می آورد [۱۲]. هر یک از این سیستم ها کاربرد ویژه ای دارند. مثلاً در سیستم ریزدرهمروی سنج $PF-S$ ، می توان با ساخت کاوشگر فیبرنوری نوک تخت که ابعاد نوک آن در حد میکرو و/یا نانومتر باشد، توان جداسازی سیستم را با دقت بالایی افزایش داد [۱۳]. همچنین در سیستم های ریزدرهمروی سنج $MF-S$ ، با انتخاب کاوشگر فیبرنوری نوک ریزعدسی دار^۳ مناسب و افزایش قدرت کانونی کردن پرتو روی سطح نمونه، داده های اضافی در حین عمل روبش را به طور محسوسی کاهش داد [۱۴].

¹ Plane Fiber-Sample optical microcavity

² Microlnsed Fiber-Sample optical microcavity

³ Microlensed Tip Optical Fiber Probe

ریزعدسی های ساخته شده در نوک فیبرنوری، مشابه کاوشگرهای فیبرنوری نوک ریزعدسی دار، در مخابرات نوری از اهمیت ویژه ای برخوردارند. بطوریکه برای جفت نمودن و انتقال بهینه نور، از این سیستم ها استفاده می شود [۱۵ و ۱۶]. در واقع، ریزعدسی نوک کاوشگر فیبرنوری، می تواند با افزایش زاویه پذیرش آن، بازده انتقال نور را از منبع به فیبرنوری افزایش دهد [۱۷ و ۱۸]. چگونگی ساخت ریزعدسی بر روی نوک کاوشگر فیبرنوری، می تواند بر کارکرد این ریزعدسی ها تأثیر بسزایی داشته باشد [۱۹ و ۲۰]. به کمک روشهای گوناگون ساخت این ریزعدسی ها، سطح مقطع خمش آنها می تواند به صورت شکلهای هندسی متفاوتی (از جمله کروی، سهموی و...) شکل داده شود. این درحالی است که برای بیان عملکرد آنها، از مدل ساده پیرامحوری^۱ استفاده می شود [۲۱-۲۶]. در این حالت عملکرد این ریزعدسی ها، تقریباً غیر وابسته به شکل سطح مقطع آنها، یکسان بیان می شود، که با دقت نظر بیشتر نمی بایستی چنین باشد. در واقع می بایست مدل جامعی^۲، بدون تقریب پیرامحوری ارائه شود تا تفاوت ویژگی ریزعدسی ها با سطح مقطع های گوناگون آشکار گردد.

در این پایان نامه، بررسی سیستم های PF-S و MF-S، به دو صورت نظری و عملی ارائه شده است. در فصل دوم، که به بررسی نظری پرداخته شده، نخست، تابع موج مربوط به چشمه نور مورد استفاده در سیستم های PF-S و MF-S، معرفی گردیده است. سپس، در بخش دوم آن فصل، به چگونگی تشکیل فریزهای درهمروی در ریزکاواک اپتیکی

¹ Paraxial Model

² Comprehensive Model

سیستم های MF-S و PF-S، پرداخته شده است. در بخش سوم آن، ریزعدسی های نوک کاوشگر فیبرنوری، با استفاده از دو مدل پیرامحوری و مدل جامع، تحلیل و بررسی شده اند.

در فصل سوم این پایان نامه، بررسی عملی سیستم های MF-S و PF-S، آورده شده است. برای بررسی عملی این سیستم ها، ابتدا، چیدمان سیستم ریزدرهمروی سنجی فیبرنوری، ساخته شده در آزمایشگاه میکرو و نانوآپتیک دانشگاه شهید باهنر کرمان، معرفی شده است. سپس با ایجاد ریزکاواک های اپتیکی MF-S و PF-S، نقش فریزهای درهمروی آنها بدست آورده شده است. در پایان این فصل، چگونگی ساخت کاوشگرهای فیبرنوری نوک ریزعدسی دار با استفاده از دو روش الف) سیستم گرما-کشی جرقه الکتریکی با کنترل کامپیوتری و ب) روش اپوکسی آورده شده است.

در فصل چهارم، ابتدا، نتایج نظری و عملی فریزهای پدیدآمده ناشی از پدیده درهمروی با یکدیگر مقایسه شده اند. سپس ویژگیهای پرتوی خروجی از ریزعدسی نوک کاوشگر، با استفاده از مدل پیرامحوری و مدل جامع مورد تحلیل قرار گرفته اند.

برداشت کلی از موارد مورد اشاره در پایان نامه در فصل پنجم توضیح داده شده است.

فصل ۲

بررسی نظری ریز کاواک های

اپتیکی MF-S و PF-S

در این فصل، نخست، تابع موج مربوط به چشمه نور درون کاوشگر فیبرنوری تک حالت، معرفی شده است. سپس، بطور مختصر، تحلیل نظری مربوط به چگونگی تشکیل فریزهای درهمروی در ریزکاواک های اپتیکی MF-S و PF-S، که قبلاً توسط دکتر فاطمی و گروه به سرپرستی ایشان انجام شده [۱۱ و ۱۲ و ۲۷]، آورده شده است. پس از آن، ویژگیهای کاوشگر فیبرنوری نوک ریزعدسی دار، به صورت دقیقتر مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته اند.

۲-۱- معادله موج در یک فیبر نوری تک حالت با نمار شکست پله ای

معادله موج ψ برای یک محیط غیرهمگن، در معادله زیر صدق می کند [۲۸]

$$\nabla^2 \bar{\psi} + \bar{\nabla} \left(\frac{\bar{\nabla} n^2}{n^2} \cdot \bar{\psi} \right) - \epsilon_0 \mu_0 n^2 \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial t^2} = 0 \quad (1-2)$$

که در آن، n نمار شکست محیط و ϵ_0 و μ_0 ضرایب گذردهی الکتریکی و مغناطیسی در خلاء و t زمان است.

چنانچه محیط همگن باشد آنگاه

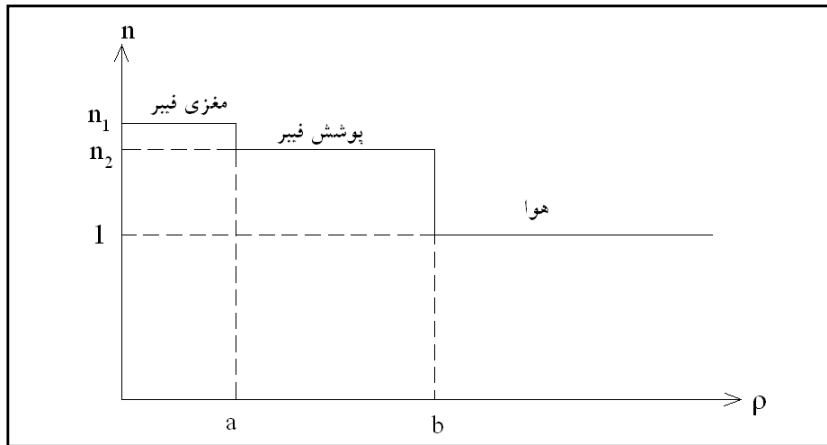
$$\bar{\nabla} \left(\frac{\bar{\nabla} n^2}{n^2} \cdot \bar{\psi} \right) = 0 \quad (2-2)$$

محیط های مغزی و پوشش فیبر، محیط هایی همگن، خطی و همسانگرد فرض می شوند [۲۹]. بنابراین رابطه (۱-۳) بصورت زیر خلاصه می شود

$$\nabla^2 \bar{\psi} - \varepsilon_0 \mu_0 n^2 \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial t^2} = 0 \quad (۳-۲)$$

مطابق شکل ۳-۱، نمارشکست یک فیبر دارای نمارشکست پله ای^۱ با رابطه زیر بیان می شود [۳۰]

$$n(\rho, \varphi) = n(\rho) = \begin{cases} n_1 & 0 < \rho < a \\ n_2 & \rho > a \end{cases} \quad (۴-۲)$$



شکل (۲-۱): نمودار تغییرات نمار شکست یک فیبر دارای نمار شکست پله ای. a شعاع مغزی فیبر، b شعاع پوشش فیبر، n_1 نمار شکست مغزی فیبر و n_2 نمار شکست پوشش فیبر است

که a شعاع سطح مقطع مغزی فیبر، b شعاع پوشش فیبر، n_1 ضریب شکست مغزی فیبر و n_2 ضریب شکست پوشش فیبر می باشد.

با تفکیک تابع ψ براساس متغیرهایش در دستگاه مختصات استوانه ای داریم

¹ step index fiber

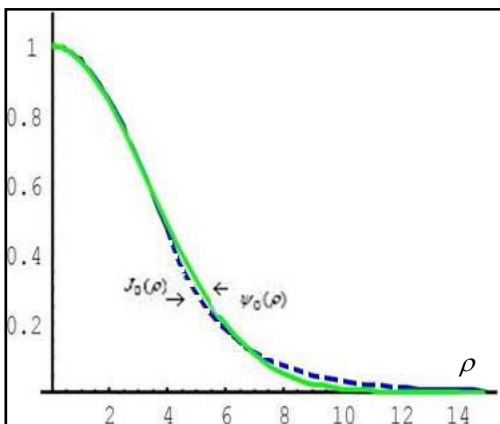
$$\psi(\rho, \varphi, z, t) = \psi(\rho, \varphi) e^{i(\omega t - kz)} \quad (۵-۲)$$

که k ثابت انتشار پرتو درون فیبر، در راستای محور آن، z ، است.

جوابهای حل این معادله در دستگاه مختصات استوانه ای، توابع بسل می باشند. بنابراین تابع موج پرتو نور، درون مغزی یک فیبر با نمار شکست پله ای، بصورت زیر است

$$\psi_{core}(\rho, \varphi, z, t) = \frac{A}{J_l(u)} J_l\left(\frac{u}{a}\rho\right) \begin{cases} \cos(l\varphi) \\ \sin(l\varphi) \end{cases} e^{i(\omega t - kz)} \quad (۶-۲)$$

این تابع، به ازای $l=0$ در ازای اندازه های بسیار کوچک مغزی فیبر، رفتاری شبیه تابع موج پرتو گاوسی دارد لذا با تقریب خوبی می توان نور منتشرشده درون مغزی فیبر را دارای گستره گاوسی در نظر گرفت. بنابراین بدلیل ساده تر بودن انجام محاسبات با پرتوی گاوسی نسبت به تابع بسل، از این پس، محاسبات خود را با تابع موج گاوسی $\psi_0(\rho, z)$ انجام خواهیم داد. در شکل زیر رفتار تقریباً یکسان این دو تابع نمایش داده شده است.



برای آشنایی بیشتر با تابع موج پرتوی گاوسی، $\psi_0(\rho, z)$ ، طریقه محاسبه آن با استفاده از معادله هلمهولتز در زیر آمده است.

شکل (۲-۲): نمودار نشان دهنده رفتار مشابه تابع

بسل $J_0(\rho)$ و تابع موج گاوسی $\psi_0(\rho)$. خط پررنگ

مربوط به تابع موج گاوسی و نقطه چین مربوط به تابع

بسل است.

معادله هلمهولتز برای انتشار یک پرتو با تابع موج ψ در یک محیط خطی همسانگرد یکنواخت بصورت زیر است [۳۱]

$$\nabla^2 \psi(x, y, z) + k^2 \psi(x, y, z) = 0 \quad (۷-۲)$$

که k ثابت انتشار پرتو در محیط است.

حل معادله بالا در حالت ساده به یک پرتو با پیشانی تخت می رسد ولی در حالت کلی، دامنه پرتو در نقاط مختلف، متفاوت است پس چنانچه جهت انتشار پرتو در راستای محور z باشد برای $\psi(x, y, z)$ ، یک تابع بصورت زیر پیشنهاد می شود که دامنه آن در نقاط مختلف، متفاوت باشد.

$$\psi(x, y, z) = U(x, y, z) e^{-ikz} \quad (۸-۲)$$

با نوشتن عملگر لاپلاسین، بصورت مجموع دو عملگر لاپلاسین مماسی و عمود بر پیشانی پرتو $\psi(x, y, z)$ و جایگذاری رابطه (۸-۲)، می توان معادله (۷-۲) را بصورت زیر نوشت

$$\nabla_t^2 (U(x, y, z) e^{-ikz}) + \nabla_z^2 (U(x, y, z) e^{-ikz}) + k^2 (U(x, y, z) e^{-ikz}) = 0 \quad (۹-۲)$$

از طرفی

$$\nabla_t^2 (U(x, y, z) e^{-ikz}) = (\nabla_t^2 U(x, y, z)) e^{-ikz} \quad (۱۰-۲ \text{ الف})$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \left(\frac{\partial U}{\partial z} - ikU \right) e^{-ikz} \quad (۱۰-۲ \text{ ب})$$

$$\begin{aligned} \nabla_z^2 (U(x, y, z) e^{-ikz}) &= \frac{\partial^2}{\partial z^2} (U(x, y, z) e^{-ikz}) \\ &= \left(\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} - ik \frac{\partial U}{\partial z} \right) e^{-ikz} - ik \left(\frac{\partial U}{\partial z} - ikU \right) e^{-ikz} \\ &= \left(\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} - 2ik \frac{\partial U}{\partial z} - k^2 U \right) e^{-ikz} \quad (۱۰-۲ \text{ ج}) \end{aligned}$$

بنابراین معادله (۹-۲) بصورت زیر درمی آید

$$\begin{aligned} \nabla_t^2 U + \left(\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} - 2ik \frac{\partial U}{\partial z} - k^2 U \right) + k^2 U &= 0 \\ \Rightarrow \nabla_t^2 U + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} - 2ik \frac{\partial U}{\partial z} &= 0 \quad (۱۱-۲) \end{aligned}$$

حالت خاصی از معادله بالا هنگامی است که تغییرات U نسبت به راستای عمود بر z بسیار آرام و یکنواخت است. بنابراین از مراتب اول و دوم مشتق U نسبت به z بسیار کوچک می باشند ولی بعلت اینکه در معادله (۱۱-۲)، $\frac{\partial U}{\partial z}$ در یک ضریب بزرگ $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ضرب شده است پس این جمله را ننگه می داریم. بنابراین، معادله (۱۱-۲) بصورت زیر خلاصه می شود

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad \Rightarrow \quad \nabla_t^2 U - 2ik \frac{\partial U}{\partial z} = 0 \quad (۱۲-۲)$$

معادله بالا، معادله دیفرانسیل برای محاسبه تابع موج یک پرتو گاوسی (TEM_{00}) است. جواب این معادله تابع موج پرتوی با پیشانی گاوسی $\psi_0(\rho, z)$ می باشد که در رابطه (۲-۱۳) آورده شده است.

$$\psi_0(\rho, z) = \left[1 + \left(\frac{z}{z_{01}} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} e^{-i[kz - \tan^{-1}\left(\frac{z}{z_{01}}\right)]} e^{-\frac{\rho^2}{w_{01}^2 \left[1 + \left(\frac{z}{z_{01}} \right)^2 \right]}} e^{-i\frac{k}{2} \frac{\rho^2}{z + z_{01}}} \quad (۲-۱۳)$$

در رابطه (۲-۱۳)، z و ρ به ترتیب، هم‌نه های طولی و عرضی انتشار و k ثابت انتشار پرتو است. پارامترهای z_{01} و w_{01} ، به ترتیب، بازه ریلی^۱ و شعاع کمر^۲ پرتو گاوسی هستند. شعاع کمر پرتوی گاوسی w_{01} ، در واقع شعاع آن در مبدأ انتشار پرتو است که شدت در آنجا بیشینه مقدار را دارد. هر چه که از کمر پرتو گاوسی، در راستای انتشار z دور شویم، پرتو اندکی واگرا شده و شعاع پرتو $w(z)$ که طبق رابطه (۲-۱۴) بدست می آید، افزایش پیدا می کند.

$$w(z) = w_{01} \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_{01}^2 n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (۲-۱۴)$$

همچنین فاصله بین کمر پرتوی گاوسی تا مکانی که در آن شعاع پرتو برابر با $\sqrt{2} w_{01}$ است، بازه (یا گستره) ریلی، z_{01} ، نامیده می شود. در این بازه، پیشانی پرتوی گاوسی

¹ Rayleigh range

² Beam waist