



ساخت تداخل سنج چینی میکروسکپی با استفاده از توری پراش

پایان نامه کارشناسی ارشد

عبداله محمدیان

استاد راهنما: دکتر احمد درودی

استاد مشاور: دکتر سید نادر سید ریحانی

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به پدر و مادر بزرگوارم و همسر مهربانم

قدردانی و تشکر

از استاد گرانقدر جناب آقای دکتر احمد درودی استاد راهنمای این پروژه که در کلیه مراحل ، راهنما و با شخصیت منحصر به فرد تأثیر عمیقی بر من داشتند، سپاسگزاری می کنم. از جناب آقای دکتر سید نادر سید ریحانی که در این پایان نامه مشاور من بوده‌اند و در تهیه امکانات آزمایشگاهی کمک زیادی به من کردند نهایت تشکر را دارم. از جناب آقای دکتر خالصی فرد برای ایجاد فضایی صمیمی در بخش اپتیک و کلیه زحمات ایشان نهایت سپاس را دارم. از دوست بسیار خوب آقای احسان احدی اخلاقی دانشجوی دکترای اپتیک که کمک های زیادی به من کردند سپاسگزارم.

چکیده

در این پایان نامه ابتدا میکروکره ها، امواج در داخل میکروکره ها (WGMS) و طریقه ساخت میکروکره ها مرور اجمالی می شوند. با معرفی تداخل سنجی چینشی چند راه ایجاد چینش بررسی شده است. سپس با معرفی روش های محاسبه توزیع فاز، چند نمونه از روش های موجود برای محاسبه نمایه ضریب شکست فیبر نوری آورده شده است. در ادامه ساخت یک تداخل سنج میکروسکوپی چینشی ارائه شده است، که در آن برای ایجاد چینش از توری پراش استفاده شده است، از مزایای تداخل سنج ساخته شده می توان به امکان تغییر چینش و در نتیجه افزایش دقت اندازه گیری اشاره نمود. در پایان با استفاده از تداخل سنج چینشی ساخته شده از طریق رابطه بین تغییرات فاز با تغییرات ضریب شکست، نمایه ضریب شکست فیبر نوری اندازه گیری شده است. نتایج حاصل از اندازه گیری، با نتایج به دست آمده از میکروسکوپ OLYMPUS IX71 با روش (DIC) مقایسه گردیده که صحت عملکرد تداخل سنج ساخته شده را نشان می دهد.

فهرست

| | |
|-------|-----|
| چکیده | پنج |
| مقدمه | هفت |

۱ معرفی میکروکره ها

| | | |
|----|---|----|
| ۱ | معرفی WGMs | ۱ |
| ۲ | ۱.۱.۱ خواص طیفی WGMs در یک میکروکره | ۲ |
| ۷ | ۲.۱ تشدیدگرهای میکروکروی | ۷ |
| ۸ | ۱.۲.۱ شرط تشدید | ۸ |
| ۹ | ۳.۱ فاکتور کیفی | ۹ |
| ۱۰ | ۴.۱ ساخت تشدیدگرهای میکروکروی با فاکتور کیفی بالا | ۱۰ |

۲ مروری بر تداخل سنجی

| | | |
|----|--|----|
| ۱۱ | ۱.۲ تداخل سنجی با استفاده از جبهه موج مرجع | ۱۱ |
|----|--|----|

| | | |
|----|---|-------|
| ۱۲ | تداخل سنجی بدون استفاده از جبهه موج مرجع | ۲.۲ |
| ۱۲ | تداخل سنجی چینی | ۱.۲.۲ |
| ۱۴ | روشهای ایجاد چینی | ۳.۲ |
| ۱۴ | منشور ولستون | ۱.۳.۲ |
| ۱۵ | سیستم اپتیکی DIC | ۲.۳.۲ |
| ۱۸ | توری رانکی | ۳.۳.۲ |
| ۲۰ | چینش با یک تیغه شیشه ای | ۴.۳.۲ |
| ۲۲ | روش های تعیین فاز | ۴.۲ |
| ۲۲ | تعیین توزیع فاز با تحلیل فریزهای تداخلی در فضای فوریه | ۱.۴.۲ |
| ۲۳ | تعیین توزیع فاز به روش تغییر فاز پله ای | ۲.۴.۲ |
| ۲۴ | روش تغییر فازهای متعدد | ۵.۲ |
| ۲۴ | روش آشکارسازی هم زمان | ۱.۵.۲ |
| ۲۵ | روش کمترین مربعات | ۲.۵.۲ |
| ۲۶ | روش های مختلف ایجاد تغییر فاز | ۶.۲ |
| ۲۶ | آینه متحرک | ۱.۶.۲ |
| ۲۶ | توری پراش متحرک | ۲.۶.۲ |
| ۲۶ | تیغه موازی | ۳.۶.۲ |
| ۲۷ | مروری بر روش های تعیین نمایه ضریب شکست فیبر نوری | ۷.۲ |
| ۲۷ | روش های غیر تداخل سنجی | ۱.۷.۲ |

| | | |
|----|---|-------|
| ۲۷ | روش های تداخل سنجی | ۲.۷.۲ |
| ۳۰ | استفاده از تداخل سنج ماخ – زندر همراه با چینش جانبی [۱۰،۲۲] | ۳.۷.۲ |
| ۳۱ | تداخل سنج چینشی با تیغه | ۴.۷.۲ |

۳ ساخت میکروسکوپ تداخلی چینشی

| | | |
|----|---|-------|
| ۳۳ | فیبر نوری | ۱.۳ |
| ۳۳ | ضریب شکست پله ای | ۱.۱.۳ |
| ۳۳ | ضریب شکست تدریجی | ۲.۱.۳ |
| ۳۴ | مایع تطبیق ضریب شکست | ۲.۳ |
| ۳۴ | طریقه‌ی ساخت سل | ۳.۳ |
| ۳۵ | نحوه آزمون مایع تطبیق ضریب شکست | ۴.۳ |
| ۳۵ | استفاده از میکروسکوپ OLYMPUS IX۷۱ | ۱.۴.۳ |
| ۳۷ | استفاده از تداخل سنج چینشی | ۲.۴.۳ |
| ۳۹ | اندازه گیری نمایه ضریب شکست با میکروسکوپ OLYMPUS IX71 | ۵.۳ |
| ۳۹ | محاسبه تغییرات فاز | ۱.۵.۳ |
| ۴۱ | محاسبه نمایه ضریب شکست فیبر | ۲.۵.۳ |
| ۴۳ | چیدمان میکروسکوپ تداخلی چینشی | ۶.۳ |
| ۴۷ | مدار تقویت کننده | ۷.۳ |
| ۴۹ | محاسبه چینش | ۸.۳ |

| | | |
|----|-------|----------------------------------|
| ۴۹ | | ۹.۳ محاسبه فاز |
| ۵۴ | | ۱۰.۳ محاسبه خطا و مقایسه داده ها |
| ۵۶ | | ۱۱.۳ نتیجه گیری |
| ۵۷ | | مراجع |

مقدمه

تشدیدگرهای اپتیکی امروزه کاربرد فراوانی در علوم و تکنولوژی دارند از جمله تشدیدگرهای مهم می توان به میکرو دیسک ها و میکرو کره ها اشاره کرد که در ساخت حسگرها و میکرو لیزرها به کار می روند. در تشدیدگرها ماکزیمم فرکانس تشدید به اندازه، شکل و ضریب شکست آنها بستگی دارد. فاکتور کیفیت این میکرو تشدیدگرها پارامتر مهمی است که در اثر ناهمگنی ضریب شکست و عدم تقارن در تشدیدگرافت می کند، لذا پس از ساخت نیاز به اندازه گیری این پارامترها می باشد. تعیین نمایه ضریب شکست فیبر نوری که میکرو کره ها از آنها ساخته می شوند در پیشگویی خصوصیات آنها از اهمیت بالایی برخوردار است. چندین روش برای اندازه گیری توزیع ضریب شکست فیبرهای نوری وجود دارد که می توان آنها را برای این منظور به کار برد. یکی از این روش ها استفاده از تداخل سنجی چینشی میکروسکوپی است. در این پایان نامه از روش تداخل سنجی چینشی جهت اندازه گیری نمایه ضریب شکست استفاده شده است و نمایه ضریب شکست جهت سادگی بررسی آن متقارن فرض شده است. جهت ایجاد چینش از توری پراش استفاده شده است، استفاده از دو توری پراش جهت ایجاد چینش این امکان را می دهد که چینش های متفاوتی ایجاد شود. جهت تحلیل فریزهای تداخلی چندین روش که از جمله آنها روش تبدیل فوریه و تغییر فاز می باشند وجود دارد که در این پایان نامه از روش تغییر فاز پله ای استفاده شده است. به منظور اعمال تغییر فاز از حرکت یکی از توری ها بر روی دیگری استفاده شده است. نتیجه تداخل سنج چینشی مشتق توزیع فاز خروجی از نمونه است، لذا با جایگذاری در رابطه معکوس آبل نمایه ضریب شکست از آن محاسبه می گردد. جهت آزمون درستی نتایج، اندازه گیری مشابهی با میکروسکوپ OLYMPUS مدل IX71 نیز صورت گرفت. این میکروسکوپ مجهز به سیستم نمایش جسم فازی با تکنیک تباین تداخل دیفرانسیلی می باشد که در واقع یک تداخل سنج چینشی است که از مواد دو شکستی جهت ایجاد چینش استفاده می کند. نتایج محاسبه نمایه ضریب شکست با این میکروسکوپ و تداخل سنج میکروسکوپی ساخته شده توافقی قابل قبولی دارند.

در فصل اول ابتدا مروری کلی بر یکی از انواع میکرو تشدیدگرهای اپتیکی با عنوان میکرو کره ها شده است. روابط انتشار امواج (WGMs) Whispering gallery modes در میکرو کره ها و طریقه ساخت میکرو کره

ها بررسی شده است. سپس در فصل دوم با توجه به هدف تعیین نمایه ضریب شکست فیبر نوری توسط تداخل سنج چینشی میکروسکوپی ابتدا با معرفی مفهوم چینش، تداخل سنجی چینشی و چند راه ایجاد چینش بررسی شده است که از جمله می توان به ایجاد چینش توسط توری پراش و تیغه شیشه ای اشاره کرد. در ادامه به روش های محاسبه تغییرات فاز و چند روش اندازه گیری نمایه ضریب شکست با استفاده از تداخل سنجی اشاره شده است. فصل سوم اختصاص به نتایج تجربی دارد که در آن ساخت تداخل سنج چینشی میکروسکوپی ارائه شده است که در آن ایجاد چینش توسط چرخش توری انجام می گیرد برای حرکت دادن به یکی از توری ها برای اعمال تغییر فاز از پیزو استفاده شده است که با رایانه و از طریق مدار الکترونیکی طراحی شده کنترل می شود. پس از تحلیل داده ها، نتایج به دست آمده با نتایج به دست آمده از روش (DIC) که در فصل دوم معرفی شده است، مقایسه شده است.

فصل اول

معرفی میکروکره ها

از کره های دی الکتریک به عنوان میکرو کاواک های اپتیکی سه بعدی استفاده می شود. این فصل را ابتدا با معرفی Whispering Gallery Modes یا WGMs که امواج منتشر شده در داخل کره ها می باشند شروع کرده و در ادامه با بررسی خواص طیفی WGMs به معرفی میکرو کره ها و پارامترهای آن می پردازیم.

۱.۱ معرفی WGMs

Whispering Gallery Modes یا WGMs اولین بار در مجموعه گنبدی شکل کلیسای Paul's در لندن مشاهده شدند سخنان «درگوشی» کنار دیوار در طول مجموعه تا ۴۲ متر دورتر شنیده می شد. لرد ریلی اولین بار این اثر را به صورت اثر باز کانونی شدن صوت پیشرونده از سطح منحنی وار گالری توضیح داد [۱]. از روی این مشاهده ایده امکان وجود کاربردهای برای میدان مدهای الکترومغناطیسی محبوس شده مطرح شد.

۱.۱.۱ خواص طیفی WGMs در یک میکروکره

طیف WGMs توسط شکل آنها و یا توسط توزیع فضایی ضریب شکست داخل اجسام تشدیدگر تعیین می‌شوند. یک روش ساده برای توصیف تقریبی از WGMs با Q بالا (فاکتور Q کسری از افت نور، به ازای یک دور از مسیر دایره ای حول کره که نور می‌پیماید) به صورت زیر است:

یک کره دی‌الکتریک با ثابت دی‌الکتریک $\varepsilon(r)$ که فقط به r بستگی دارد را در نظر می‌گیریم، برای به دست آوردن میدان الکترونیکی داخل کره از معادلات ماکسول [۲]:

$$\nabla \cdot D = 0 \quad (۱)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (۲)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (۳)$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (۴)$$

با استفاده از اتحاد برداری زیر:

$$\nabla \times \nabla \times A = \nabla(\nabla \cdot A) - \nabla^2 A \quad (۵)$$

اگر از معادله (۳) کرل بگیریم خواهیم داشت:

$$\nabla \times \nabla \times E = \nabla(\nabla \cdot E) - \nabla^2 E = -\mu \nabla \times \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right) \quad (۶)$$

با استفاده از رابطه (۱)

$$\nabla \cdot D = \nabla \cdot \varepsilon(r)E = 0 \quad (۷)$$

و استفاده از رابطه (۴) خواهیم داشت:

$$\nabla^2 E = \mu\varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial E}{\partial t} \right) \quad (۸)$$

یا

$$\nabla^2 E - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (۹)$$

با فرض اینکه کمیت‌های میدان به صورت

$$E(\vec{r}, t) = E(\vec{r})e^{i\omega t} \quad (۱۰)$$

تغییر می‌کنند:

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \quad (۱۱)$$

که در آن

$$k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} \quad (۱۲)$$

مدهای کره دی الکترونیک توسط حل معادله هلمهولتز برای بردارهای میدان الکترونیکی و مغناطیسی با شرایط مرزی مناسب تعیین می‌شوند. از لحاظ عددی راستای قطبش میدان الکترومغناطیسی یک کره در امتداد محورهای مختصات کروی در تمام نقاط فضا تقریباً ثابت است، بنابراین مؤلفه‌های E_θ یا H_θ میدان الکترومغناطیسی جداپذیر است یعنی:

$$E_\theta = \psi_r(r) \cdot \psi_\theta(\theta) \cdot \psi_\phi(\phi) \quad (۱۳)$$

یا

$$H_\theta = \psi_r(r) \cdot \psi_\theta(\theta) \cdot \psi_\phi(\phi) \quad (۱۴)$$

در اینجا ما مد الکتریکی عرضی (TE) را بررسی می‌کنیم که در آن میدان الکتریکی موازی با سطح می‌باشد

یعنی :

$$\vec{E} = E_{\theta} \vec{\theta} \quad (15)$$

و

$$E_{\phi} = E_r = 0 \quad (16)$$

فرآیند مشابهی برای مطالعه مد مغناطیسی عرضی (TM) می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

بررسی معادله موج (5) در مختصات کروی به صورت زیر است:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial E}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta) \frac{\partial E}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 E}{\partial \phi^2} + k^2 E = 0 \quad (17)$$

یا

$$\frac{1}{\psi_r} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\psi_r}{dr} \right) + \frac{1}{\psi_{\theta} \sin \theta} \frac{d}{d\theta} (\sin \theta \frac{d\psi_{\theta}}{d\theta}) + \frac{1}{\psi_{\phi} \sin^2 \theta} \frac{d^2 \psi_{\phi}}{d\phi^2} + k^2 r^2 = 0 \quad (18)$$

با روش جداسازی متغیرها می‌توان معادله را حل کرد که جواب به صورت سه معادله بر حسب r و θ و ϕ

خواهد بود.

جوابی که وابستگی شعاعی را نشان می‌دهد به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{d^2 \psi_r}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\psi_r}{dr} + \left(k^2 - \frac{l(l+1)}{r^2} \right) \psi_r = 0 \quad (19)$$

که این جواب همان معادله بسل کروی می‌باشد که جواب‌های آن توابع بسل کروی از درجه 1 نامیده

می‌شوند، که برای کره جواب‌های کلی معادله بالا به صورت زیر است:

$$\psi_r = c_1 j_l(kr) + c_2 n_l(kr) \quad (20)$$

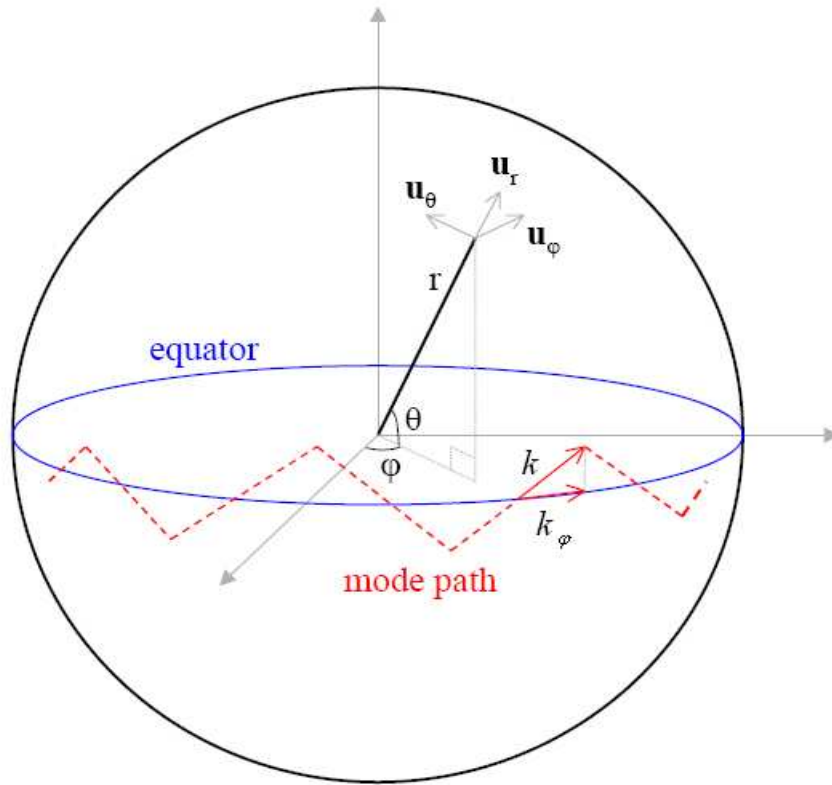
به خاطر تقارن کروی، مدهای WGMs مشابه توابع موج الکترون در یک اتم هیدروژن می‌باشند اما اختلافهایی در طبیعت برداری میدانهای الکترومغناطیسی آنها وجود دارد. مدهای WGMs در کل توابع نوسانی از r ، θ و ϕ هستند، که در آنها به ترتیب n ، l و m اعداد مد شعاعی، قطبی و سمتی می‌باشند. تعداد n بیشینه در راستای شعاعی درون کره، تعداد $2l$ بیشینه میدان در راستای سمتی و تعداد $l-m+1$ بیشینه میدان در راستای قطبی وجود دارد. به طور مثال مدی دارای مشخصه $n=1$ و $m=l$ یک بیشینه در راستای شعاعی داخل کره و یک بیشینه در راستای قطبی در $\theta = \frac{\pi}{2}$ دارد. WGMs را می‌توان به صورت امواج شبه صفحه ای که مسیرهایی پیچ و خم دار یا زیگ زاگ را حول استوای کره می‌پیمایند تصور کرد (شکل ۱-۱) که دارای بردار موجی با بزرگی

$$k = \frac{\sqrt{l(l+1)}}{a} \quad (21)$$

و مؤلفه سمتی

$$k_\phi = \frac{m}{a} \quad (22)$$

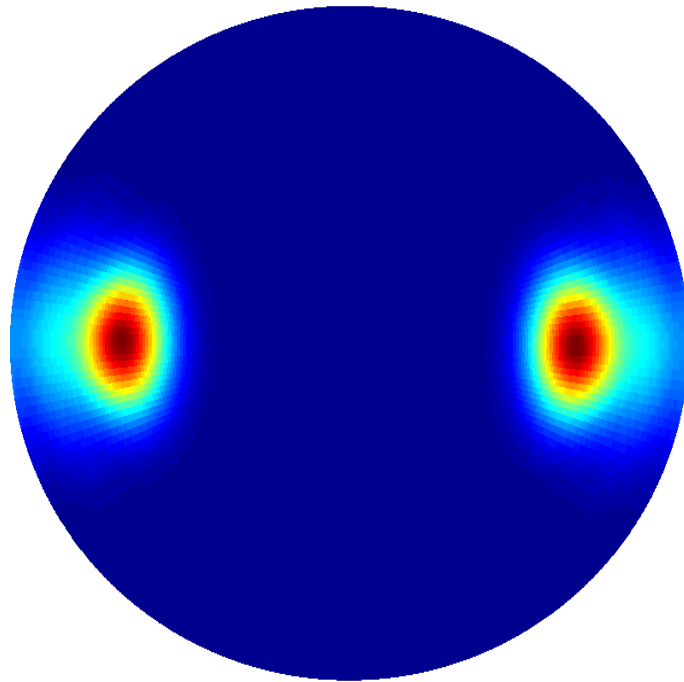
هستند. زاویه شیب پرتوهای زیگ زاگ برای مد اصلی $m=1$ کمترین مقدار یعنی $\frac{1}{\sqrt{2}}$ و برای مد $m=0$ شیب 90° درجه دارد.



شکل ۱-۱ مدلی از پرتو whispering-gallery mode [۳].

۲.۱ تشدیدگرهای میکروکروی

کره‌های دی‌الکتریک قابلیت حبس WGMs را در خود به صورت امواج الکترومغناطیسی که در کره دور می‌زنند را دارند، مدهای معین که در امتداد مسیرهایی دایره‌ای از کره هدایت می‌شوند، مدهای whispering-gallery modes (WGMs) را به دست می‌دهند [۴]. نور محبوس WGM حول استوای کره در یک نوار باریک و نازک منتشر می‌شود و به طور ثابت در برخوردی لحظه‌ای با سطح کره بازتاب می‌کند. نمایی از چگالی میدان در ناحیه استوا که با استفاده از نرم افزار MATLAB برای یک مد خاص محاسبه شده است در شکل ۱-۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۱-۲ نمایی از چگالی میدان در کره‌ای به شعاع 110 میکرومتر برای مدی به مشخصات $m=2$ و $l=10$.

۱.۲.۱ شرط تشدید

در تحلیل WGMs یک پارامتر بدون بعد تعریف می‌شود که شکل کلی آن به صورت زیر است [۵]:

$$x = \frac{2\pi a}{\lambda} = ka \quad (23)$$

که در اینجا a شعاع کره، λ طول موج و k عدد موج است.

با فرض اینکه شعاع کره خیلی بزرگتر از طول موج تابش است یعنی: $x \gg 1$ شرط تشدید در سطح میکروکره

برابر است با:

طول راه نوری که تقریباً همان محیط کره می باشد متناسب با مقدار صحیحی (1) از طول موج است یعنی:

$$\frac{2\pi a}{N} \approx l\lambda \quad (24)$$

که در اینجا N ضریب شکست میکروکره است. در یک میکروکره دی‌الکتریک تشدید ناشی از بازتاب های کلی مدها در صفحه استوایی در نزدیکی سطح میکروکره در مسیرهای دایره‌ای می باشد.

با فرض اینکه میکروکره از موادی با افت کم ساخته شده و همچنین هیچ نوع اختلالی از خارج بر میکروکره

وارد نمی‌شود، میزان حبس نور با فاکتور کیفی (Q) رابطه مستقیم دارد.

یکی از کاربردهای استفاده از تکنیک‌های مختلف تشدید، افزایش میزان حساسیت (کارایی) حسگرها به

خصوص در بیولوژی می باشد. در تشدیدگرهای میکروکروی محل ماکزیمم یا پیک‌های فرکانس تشدید به

اندازه، شکل و ضریب شکست میکروکره‌ها بستگی دارد. از جابجایی فرکانس تشدید که با تغییر شعاع یا ضریب

شکست میکروکره ایجاد می‌شود، می‌توان از WGMs به عنوان آشکار ساز که میزان اثر مولکول‌ها را در علم شیمی

و بیولوژی نشان می‌دهد استفاده کرد، این آشکار سازها با قابلیت حساسیت بالایی که دارند می‌توانند تک اتم‌ها و

مولکول‌ها را آشکارسازی کنند [۱].

۳.۱ فاکتور کیفی

فاکتور کیفی اغلب به عنوان یکی از مشخصه‌های اصلی تشدیدگرها به شمار می‌رود. این کمیت به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q_{tot} = \frac{2\pi(\text{انرژی ذخیره شده})}{\text{افت انرژی در هر دور}} = \frac{\omega_0 U}{W} \quad (25)$$

که در اینجا ω_0 فرکانس تشدید تشدیدگر است، U انرژی ذخیره شده در مد است و W انرژی هر مد است. به طور کلی چندین مکانیزم افت در تشدیدگرهای اپتیکی وجود دارند که افت کلی به صورت زیر تعریف می‌شود [۶]:

$$\frac{1}{Q_{tot}} = \frac{W_{tot}}{\omega_0 U} = \frac{W_{mat}}{\omega_0 U} + \frac{W_{ss}}{\omega_0 U} + \frac{W_{sc}}{\omega_0 U} + \frac{W_{rad}}{\omega_0 U} = \frac{1}{Q_{mat}} + \frac{1}{Q_{ss}} + \frac{1}{Q_{sc}} + \frac{1}{Q_{rad}} \quad (26)$$

که در رابطه فوق

$\frac{1}{Q_{mat}}$ افت جذبی ماده را نشان می‌دهد.

$\frac{1}{Q_{ss}}$ افت پراکندگی ناشی از ناهمگنی‌های سطح را نشان می‌دهد.

$\frac{1}{Q_{sc}}$ افت ناشی از آلاینده‌های سطح را نشان می‌دهد.

$\frac{1}{Q_{rad}}$ افت تونل زنی ناشی از مرز منحنی وار واقع در مسیر انتشار مد را نشان می‌دهد.

مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که $\frac{1}{Q_{rad}}$ با افزایش اندازه میکرو کره به طور نمایی افزایش می‌یابد.