

رسالة محمد



دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد

رشته‌ی فیزیک گرایش اتمی و مولکولی در زمینه‌ی لیزر

بررسی انتشار امواج، درون موجبر جفت شده با میکروکاواک

آمیخته به نقاط کوانتومی

استاد راهنما:

دکتر حسن رنجبر عسکری

دانشجو:

سلیمه اسدی مشیزی

مهر ماه ۱۳۹۲



دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

دانشکده‌ی علوم پایه

گروه فیزیک

پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش اتمی و مولکولی

سلیمه اسدی مشیزی

بررسی انتشار امواج، درون موجبر جفت شده با میکروکاواک آمیخته به

نقاط کوانتومی

در تاریخ ۹۲/۰۷/۲۷ توسط هیات داوران زیر بررسی و با درجه تمایز ... به تصویب نهایی رسید.

امضاء
امضاء
امضاء
امضاء

با مرتبه‌ی علمی دانشیار

با مرتبه‌ی علمی استادیار

با مرتبه‌ی علمی مربی

با مرتبه‌ی علمی دانشیار

دکتر حسن رنجبر عسکری

دکتر مهیار ماهجویی

محمد خان زاده

دکتر حمیدرضا افشین

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه

۲- استاد داور داخل گروه

۳- استاد داور داخل گروه

۴- نماینده‌ی تحصیلات تکمیلی

فهرست مطالب

| عنوان..... | صفحه..... |
|--|-----------|
| فصل اول: مقدمه و مروری بر پژوهش‌های انجام شده | ۱ |
| فصل دوم: مشخصات کلی تشدیدگر میکرو حلقه | ۵ |
| ۱-۲- مقدمه | ۵ |
| ۲-۲- نظریه‌ی میکرو حلقه | ۶ |
| ۱-۲-۲- ناحیه جفت‌شدگی | ۷ |
| ۲-۲-۲- شدت درون تشدیدگر و تابع تبدیل | ۹ |
| ۳-۲- ویژگی‌های تشدیدگر میکرو حلقه | ۱۰ |
| ۴-۲- عوامل ایجاد اتلاف در تشدیدگرها | ۱۳ |
| ۵-۲- اپتیک غیر خطی با تشدیدگرهای میکرو حلقه | ۱۴ |
| ۶-۲- مزایای میکرو حلقه‌ها | ۱۵ |
| ۷-۲- خواص غیر خطی | ۱۶ |
| ۸-۲- طرح‌های جفت‌شدگی | ۱۶ |
| ۱-۸-۲- جفت‌شدگی جانبی (عرضی) | ۱۷ |
| ۲-۸-۲- جفت‌شدگی عمودی | ۱۷ |
| فصل سوم: نقاط کوانتومی و شفافیت القایی الکترومغناطیسی | ۱۸ |
| ۱-۳- مقدمه | ۱۸ |
| ۲-۳- نقاط کوانتومی | ۱۹ |
| ۳-۳- ساخت نقاط کوانتومی | ۱۹ |
| ۴-۳- خواص نقاط کوانتومی | ۲۰ |
| ۵-۳- کاربردهای نقاط کوانتومی | ۲۲ |
| ۶-۳- شفافیت القایی الکترومغناطیسی | ۲۵ |
| ۷-۳- تأثیر شعاع نقطه کوانتومی در قسمت‌های حقیقی و موهومی پذیرفتاری | ۳۰ |

- ۳-۸- تأثیر میدان کنترل بر شفافیت القایی الکترومغناطیسی ۳۲
- فصل چهارم: پیکربندی‌های متفاوت تشدیدگر میکرو حلقه جفت شده با موجبر ۳۴
- ۴-۱- تشدیدگر حلقه‌ای اضافه و قطع ۳۴
- ۴-۲- تشدیدگرهای حلقه‌ای دوگانه ۳۶
- ۴-۳- پدیده‌ی EIT در تشدیدگرهای میکرو حلقه ۳۷
- ۴-۴- جفت شدگی تشدیدگرهای حلقه‌ای دوگانه به صورت موازی ۳۸
- ۴-۵- پدیده‌ی EIT در سیستم دو تشدیدگر ۴۲
- ۴-۶- تأثیر اختلاف شعاع حلقه‌ها در تشدیدگر میکرو حلقه ۴۳
- ۴-۷- تأثیر جدایی بین حلقه‌ها در تشدیدگر میکرو حلقه ۴۵
- ۴-۸- تأثیر ضرایب جفت شدگی متفاوت در تشدیدگر میکرو حلقه ۴۶
- ۴-۹- تأثیر ضریب اتلاف در تشدیدگر میکرو حلقه ۴۷
- ۴-۱۰- جفت شدگی تشدیدگرهای حلقه‌ای دوگانه به صورت سری ۴۸
- ۴-۱۱- تأثیر اختلاف شعاع حلقه‌ها در تشدیدگر میکرو حلقه ۵۰
- ۴-۱۲- تأثیر ضرایب جفت شدگی بین تشدیدگرهای حلقه‌ای و موجبر ۵۳
- فصل پنجم: تشدیدگر میکرو حلقه آمیخته به نقاط کوانتومی ۵۶
- ۵-۱- پدیده‌ی EIT در تشدیدگر حلقه‌ای تکی آمیخته به نقاط کوانتومی جفت شده با موجبر ۵۶
- ۵-۲- مقایسه‌ی توان عبوری از موجبر، برای میکرو حلقه‌ی آمیخته به نقاط کوانتومی و میکرو حلقه‌ی بدون نقاط کوانتومی ۶۰
- ۵-۳- تأثیر نقاط کوانتومی بر توان عبوری، با چگالی تعداد 10^{23} و به ازای شعاع‌های متفاوت ۶۲
- ۵-۴- تأثیر نقاط کوانتومی بر توان عبوری با چگالی تعداد 10^{22} و به ازای شعاع‌های متفاوت ۶۳
- ۵-۵- تأثیر چگالی تعداد نقاط کوانتومی متفاوت بر توان عبوری ۶۴
- ۵-۵-۱- تأثیر چگالی تعداد نقاط کوانتومی متفاوت بر توان به ازای 10^{22} چگالی تعداد نقطه کوانتومی اولیه ۶۴
- ۵-۵-۲- تأثیر چگالی تعداد نقاط کوانتومی متفاوت بر توان به ازای 10^{23} چگالی تعداد نقطه کوانتومی اولیه ۶۶

فصل ششم: نتیجه گیری ۶۸

فهرست منابع ۷۰

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: میکرو حلقه جفت شده با موجبر ۶
- شکل ۲-۲: ناحیه جفت شدگی ۷
- شکل ۳-۲: ناحیه جفت شدگی در میکرو حلقه جفت شده به موجبر ۹
- شکل ۴-۲: طرح‌های جفت شدگی عمودی و جانبی ۱۶
- شکل ۱-۳: ساختار کلی یک نقطه کوانتومی ۱۹
- شکل ۲-۳: سیستم سه ترازه نوع Λ ۲۵
- شکل ۳-۳: قسمت حقیقی پذیرفتاری در غیاب ($\Omega_C = 0$ ، خط ممتد) و در حضور ($\Omega_C = 4 \times 10^{12}$) نقطه چین) میدان کنترل، شکل سمت راست مربوط به شعاع نقطه کوانتومی ($6nm$) و سمت چپ ($5nm$) ۳۱
- شکل ۴-۳: قسمت موهومی پذیرفتاری در غیاب ($\Omega_C = 0$ ، خط ممتد) و در حضور ($\Omega_C = 4 \times 10^{12}$) نقطه چین) میدان کنترل، شکل سمت راست مربوط به شعاع نقطه کوانتومی ($6nm$) و سمت چپ ($5nm$) ۳۱
- شکل ۵-۳: قسمت حقیقی پذیرفتاری به ازای میدان‌های کنترل متفاوت (خط ممتد به سمت نقطه چین میدان کنترل E_c افزایش می‌یابد). ۳۲
- شکل ۶-۳: قسمت موهومی پذیرفتاری به ازای میدان‌های کنترل متفاوت (خط ممتد به سمت نقطه چین میدان کنترل E_c افزایش می‌یابد). ۳۲
- شکل ۱-۴: تشدیدگر حلقه‌ای اضافه و قطع ۳۵
- شکل ۲-۴: جفت شدگی سیستم دو تشدیدگر به صورت موازی ۳۸
- شکل ۳-۴ الف: توان عبوری از درگاه خروجی برای $\delta r = 0nm, 0.5nm, 1nm$ (خط ممتد به سمت نقطه چین اختلاف شعاع δr افزایش می‌یابد). ۴۳
- شکل ۳-۴ ب: توان عبوری از درگاه خروجی برای $\delta r = 2nm, 5nm, 7nm$ (خط ممتد به سمت نقطه چین اختلاف شعاع δr افزایش می‌یابد). ۴۴
- شکل ۴-۴ الف: توان عبوری از درگاه قطع برای $\delta r = 0nm, 0.5nm, 1nm$ (خط ممتد به سمت نقطه چین اختلاف شعاع δr افزایش می‌یابد). ۴۴
- شکل ۴-۴ ب: توان عبوری از درگاه قطع برای $\delta r = 2nm, 5nm, 7nm$ (خط ممتد به سمت نقطه چین اختلاف شعاع δr افزایش می‌یابد). ۴۵
- شکل ۵-۴: توان عبوری از درگاه خروجی برای جدایی Lg های متفاوت (خط ممتد به سمت نقطه چین جدایی بین حلقه‌ها Lg افزایش می‌یابد). ۴۵

- شکل ۴-۶: توان عبوری از درگاه قطع برای جدایی Lg های متفاوت (خط ممتد به سمت نقطه چین جدایی بین حلقه‌ها Lg افزایش می‌یابد). ۴۶
- شکل ۴-۷: توان عبوری از درگاه خروجی برای ضرایب جفت‌شدگی متفاوت (خط ممتد به سمت نقطه چین ضرایب جفت‌شدگی k افزایش می‌یابد). ۴۷
- شکل ۴-۸: توان عبوری از درگاه قطع برای ضرایب جفت‌شدگی متفاوت (خط ممتد به سمت نقطه چین ضرایب جفت‌شدگی k افزایش می‌یابد). ۴۷
- شکل ۴-۹: توان عبوری از درگاه خروجی برای ضرایب اتلاف متفاوت (خط ممتد به سمت نقطه چین ضریب اتلاف α افزایش می‌یابد). ۴۸
- شکل ۴-۱۰: توان عبوری از درگاه قطع برای ضرایب اتلاف متفاوت (خط ممتد به سمت نقطه چین ضریب اتلاف α افزایش می‌یابد). ۴۸
- شکل ۴-۱۱: جفت‌شدگی تشدیدگرهای حلقه‌ای به صورت سری ۴۹
- شکل ۴-۱۲ الف: توان عبوری از درگاه خروجی برای δr های متفاوت و به ازای $k_1 = k_3 = 0.3$ (خط ممتد به سمت نقطه چین اختلاف شعاع δr افزایش می‌یابد). ۵۱
- شکل ۴-۱۲ ب: توان عبوری از درگاه خروجی برای δr های متفاوت و به ازای $k_1 = k_3 = 0.3$ (خط ممتد به سمت نقطه چین اختلاف شعاع δr افزایش می‌یابد). ۵۱
- شکل ۴-۱۳ الف: توان عبوری از درگاه قطع برای δr های متفاوت و به ازای $k_1 = k_3 = 0.3$ (خط ممتد به سمت نقطه چین اختلاف شعاع δr افزایش می‌یابد). ۵۲
- شکل ۴-۱۳ ب: توان عبوری از درگاه قطع برای δr های متفاوت و به ازای $k_1 = k_3 = 0.3$ (خط ممتد به سمت نقطه چین اختلاف شعاع δr افزایش می‌یابد). ۵۲
- شکل ۴-۱۴ الف: تغییرات توان عبوری از درگاه خروجی به ازای ضرایب جفت‌شدگی (k_2) متفاوت (خط ممتد به سمت نقطه چین ضریب جفت‌شدگی بین دو حلقه k_2 افزایش می‌یابد). ۵۳
- شکل ۴-۱۴ ب: تغییرات توان عبوری از درگاه خروجی به ازای ضرایب جفت‌شدگی (k_1, k_3) متفاوت (خط ممتد به سمت نقطه چین ضریب جفت‌شدگی بین حلقه‌ها و موجبرها $k_1 = k_3$ افزایش می‌یابد). ۵۴
- شکل ۴-۱۵ الف: تغییرات توان عبوری از درگاه قطع به ازای ضرایب جفت‌شدگی (k_2) متفاوت (خط ممتد به سمت نقطه چین ضریب جفت‌شدگی بین دو حلقه k_2 افزایش می‌یابد). ۵۴
- شکل ۴-۱۵ ب: تغییرات توان عبوری از درگاه قطع به ازای ضرایب جفت‌شدگی (k_1, k_3) متفاوت (خط ممتد به سمت نقطه چین ضریب جفت‌شدگی بین حلقه‌ها و موجبرها $k_1 = k_3$ افزایش می‌یابد). ۵۵
- شکل ۵-۱: نقطه کوانتومی سه ترازه ۵۸

شکل ۵-۲: توان عبوری در غیاب(خط ممتد) و حضور(نقطه چین) نقاط کوانتومی به ازای 10^{23} چگالی تعداد
۶۱

شکل ۵-۳: توان عبوری در غیاب(خط ممتد) و حضور(نقطه چین) نقاط کوانتومی به ازای 10^{22} چگالی تعداد
۶۱

شکل ۵-۴: توان عبوری بر حسب فرکانس، برای میکرو حلقه با وجود نقاط کوانتومی به ازای 10^{23} چگالی تعداد
نقاط کوانتومی و به ازای شعاع‌های متفاوت(خط ممتد به سمت نقطه چین شعاع نقطه کوانتومی افزایش
می‌یابد). ۶۲

شکل ۵-۵: توان میکرو حلقه با وجود نقاط کوانتومی به ازای 10^{22} چگالی تعداد و شعاع‌های متفاوت(خط ممتد
به سمت نقطه چین شعاع نقطه کوانتومی افزایش می‌یابد). ۶۳

شکل ۵-۶: توان عبوری میکرو حلقه با وجود نقاط کوانتومی به ازای چگالی تعداد نقاط کوانتومی متفاوت(خط
ممتد به سمت نقطه چین چگالی تعداد نقاط کوانتومی افزایش می‌یابد). ۶۵

شکل ۵-۷: توان عبوری میکرو حلقه با وجود نقاط کوانتومی به ازای چگالی تعداد نقاط کوانتومی متفاوت(خط
ممتد به سمت نقطه چین چگالی تعداد نقاط کوانتومی افزایش می‌یابد). ۶۶

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۵: مقدار توان عبوری برای فرکانس‌های متفاوت به ازای 10^{23} چگالی تعداد نقاط کوانتومی ۶۳
- جدول ۲-۵: مقدار توان عبوری برای شعاع‌های متفاوت به ازای 10^{22} چگالی تعداد نقاط کوانتومی ۶۴
- جدول ۳-۵: مقدار توان عبوری برای چگالی تعداد نقاط کوانتومی متفاوت به ازای 10^{22} چگالی تعداد نقطه کوانتومی اولیه ۶۵
- جدول ۴-۵: مقدار توان عبوری برای چگالی تعداد نقاط کوانتومی متفاوت به ازای 10^{23} چگالی تعداد نقطه کوانتومی اولیه ۶۷

فصل اول

مقدمه و

مروری بر پژوهش‌های انجام شده

چند دهه پیش دانشمندی به نام فاینمن^۱، نظریه‌ای ارائه کرد تا به جای الکترون در مدارها از فوتون استفاده شود، به همین دلیل دانشمندان به فکر افتادند که علاوه بر خطوط ارتباطی استوار بر نور، از مدارهای مجتمع نوری برای محاسبات، کلیدزنی و ذخیره اطلاعات استفاده کنند. روز به روز بر دانش مربوط به نور و اثرات مربوط به آن در ماده افزوده و از اثرات غیر خطی آن، در مدارهای مجتمع نوری استفاده می‌شود. یکی از عناصر پایه برای استفاده در این مدارها، میکرو حلقه‌ها^۲ هستند که با ساختن عناصر پایه منطقی^۳ AND و NAND می‌توان با آنها تمام عناصر منطقی را ساخت [۱]. در یک میکرو حلقه، ضریب شکست ناحیه‌ای از فضا نسبت به محیط اطراف آن افزایش می‌یابد، بر حسب اینکه، این ناحیه شکل یک حلقه را داشته باشد، به آن میکرو حلقه، در صورتی که به شکل صفحه باشد، آن را میکرو صفحه^۴ و اگر کروی شکل باشد، به آن میکرو کره^۵ می‌گویند. نور به دلیل اختلاف

¹ Feynman

² Microrings

³ Logical Gate

⁴ Microdisk

⁵ Microsphere

ضریب شکست بین حلقه (صفحه یا کره) و محیط درون که اغلب از جنس نیم‌رسانا^۱ است، در درون حلقه (صفحه یا کره) بازتاب کلی می‌کند و این اساس کار تولید میکرو حلقه، میکرو صفحه و میکرو کره است.

از میکرو حلقه‌ها به عنوان تشدیدگر^۲ استفاده می‌شود. شدت نور در میکرو حلقه، به چندین ده برابر شدت در ورودی می‌رسد. بنابراین با شدت ورودی کم، می‌توان اثرات غیر خطی لازم را پدید آورد. با توجه به نامحدود بودن نحوه‌ی جفت‌شدگی^۳ یک یا چند حلقه به یک یا چند موجبر^۴، تاکنون ساختارهای مختلفی از میکرو حلقه‌های جفت شده با موجبرها معرفی و بررسی شده‌اند، که هر یک از این ساختارها به منظور کاربردهای متفاوتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ساخت تشدیدگر نوری، با توجه به توانایی ذخیره سازی انرژی، مورد توجه مهندسين قرار می‌گیرد. این ابزارها توانایی ذخیره سازی و تقویت میدان و ایجاد شدت میدان قوی با ورودی ضعیف را دارد. این ابزارها با وجود ساختار بسیار ساده، کاربرد و فواید فراوان دارند. مطالعه برای توسعه این فناوری و مجتمع سازی این نوع مدارها ادامه دارد.

تشدیدگرهای حلقوی نوری اولین بار در اواخر ۱۹۶۰ میلادی پیشنهاد شدند [۲]. این وسایل با شعاع‌هایی از مرتبه میکرومتر، به دلیل این که پهنای نوار باریک با محدوده‌ی طیفی آزاد^۵ پهن را برآورده می‌ساختند، بسیار مورد استفاده قرار گرفتند. امروزه تشدیدگرهای میکرو حلقه در وسایل فوتونیک از قبیل صافی‌های پیاده‌سازی کانال، کلیدزنی‌های روشن و خاموش، دیودهای نور گسیل و ... کاربردهای فراوانی دارند. مواد گوناگونی برای ساخت تشدیدگرهای میکرو حلقه به کار گرفته می‌شود. در میان تمام این مواد در دسترس، نیم‌رساناها به صورت گسترده‌ای در فناوری ساخت میکرو حلقه‌ها استفاده می‌شوند، میکرو حلقه‌هایی از جنس نیم‌رسانا، به دلیل افت خمشی قابل اغماض و همچنین اختلاف ضریب شکست بالا با محیط، بسیار رایج شده‌اند. خصوصیت غیر خطی نوری بالای نیم‌رساناها، ساخت وسایلی با کنترل فعال و وسایلی برای پردازش سیگنال‌های تمام نوری را امکان‌پذیر کرده است.

¹ Semiconductor

² Resonator

³ Coupling

⁴ Waveguide

⁵ Free Spectral Range

یکی از ابزارهایی که در سال‌های اخیر برای پردازش داده‌ها با روش تمام نوری توجه زیادی را به خود جلب کرده، میکروحلقه‌ها و میکروصفحه‌ها هستند. مطالعه و آزمایش راجع به فناوری ساخت و تولید هر چه بهتر و آسان‌تر میکروحلقه‌ها به نتایج مفیدی رسیده است و برای مشاهده‌ی پدیده‌هایی که در میکروحلقه‌ها اتفاق می‌افتد، اندازه‌گیری‌های متفاوتی شده است. تمام این زحمات به این دلیل است که دانشمندان معتقدند میکروحلقه‌ها بهترین کاندیدا برای ساخت بلوک‌های ساختمانی پایه در مدارهای مجتمع نوری هستند و در این زمینه به موفقیت‌های چشمگیری رسیده‌اند.

رستمی و همکارانش یک روش جدید مبتنی بر شفافیت القایی الکترومغناطیسی^۱ و تشدیدگر حلقه‌ای برای توصیف صافی‌های تنظیم‌پذیر تمام نوری که برای توسعه شبکه‌ها و سیستم‌های نوری ضرورت دارد، ارائه دادند. ناخالصی‌ها از جمله اتم‌های چهار ترازه یا نانوبلورها برای کنترل جذب و ضریب شکست به تشدیدگر حلقه‌ای اضافه شده‌اند و پارامترهای میدان الکترومغناطیسی کنترل یا میدان‌هایی برای دستکاری در جذب و ضریب شکست تشدیدگر حلقه‌ای استفاده شده است [۳]. قلی‌پور و همکارانش یک سلول حافظه تمام نوری قابل بارگذاری و پاک‌شدنی با استفاده از دو تشدیدگر میکروحلقه جفت‌شده را با استفاده از EIT و لیزرزایی بدون وارونگی طراحی کردند. در پژوهش آن‌ها، برای خواندن داده‌های ذخیره شده یک فاز اضافی در تشدیدگر حلقه‌ای به علت EIT معرفی شده و برای جبران اتلاف فیبر، لیزرزایی بدون وارونگی استفاده شده است. EIT با تزریق کردن نقاط کوانتومی سه ترازه نوع Λ و لیزرزایی بدون وارونگی با تزریق نقاط کوانتومی چهار ترازه نوع Y در حلقه انجام شده است [۴].

هدف این پژوهش، بررسی انتشار امواج، درون موجبر مستقیم جفت‌شده با میکروحلقه‌ی آمیخته به نقاط کوانتومی است.

در فصل دوم این پایان‌نامه، ابتدا به توصیف تشدیدگر میکروحلقه، به عنوان یک موجبر اپتیکی که ابتدا و انتهای آن به همدیگر وصل شده و به صورت حلقه درآورده شده است، می‌پردازیم. از آنجا که میکروحلقه برای استفاده باید به یک موجبر جفت شود، در ادامه‌ی فصل دوم به طرح‌های جفت‌شدگی میکروحلقه و موجبر اشاره می‌شود و برخی از برتری‌ها و ویژگی‌هایی که موجب کاربرد وسیع تشدیدگر میکروحلقه شده‌اند، آورده می‌شود.

¹ Electromagnetically Induced Transparency (EIT)

نقاط کوانتومی به دلیل اندازه‌ی کوچکشان، خصوصیات نوری و الکتریکی منحصر به فردی دارند. الکترون‌ها در پیدایش این خصوصیات نقش کلیدی ایفا می‌کنند. این نقاط یکی از جالب‌ترین و در عین حال کاربردی‌ترین نانوساختارها هستند، لذا در فصل سوم به معرفی نقاط کوانتومی و ویژگی‌های آن پرداخته‌ایم. EIT یک برهمکنش کوانتومی است که به طور معمول باعث می‌شود یک انتقال غیر شفاف بر اساس یک میدان کاوشگر کاملاً شفاف شود. به‌تازگی مطالعه‌های تجربی و نظری میکروکاواک‌های جفت شده با موجبر بدون استفاده از تشدید اتمی نشان داده است که اثرهای همدوس در این سیستم‌ها از جمله EIT به طور قابل توجهی شبیه به آن اثرها در اتم‌ها هستند. در ادامه فصل سوم به معرفی EIT می‌پردازیم.

در فصل چهارم تحلیل‌های مختلفی از موجبر جفت‌شده با میکروحلقه به ازای پارامترهای مختلف میکروحلقه، به صورت نمودار ارائه شده و اثر EIT در آن مورد بررسی قرار گرفته است و در فصل پنجم این اثر با وجود میکروحلقه‌ی آمیخته به نقاط کوانتومی مورد مطالعه قرار گرفته است.

در فصل ششم از مشاهدات نتیجه‌گیری می‌شود.

فصل دوم

مشخصات کلی تشدیدگر میکرو حلقه

در این فصل تشدیدگرهای میکرو حلقه و پارامترهای مربوط به آن معرفی شده است و همچنین به چند نمونه از کاربردهای میکرو حلقه اشاره خواهد شد و در بخش پایانی نحوه جفت‌شدگی آن با موجبر مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲-۱- مقدمه

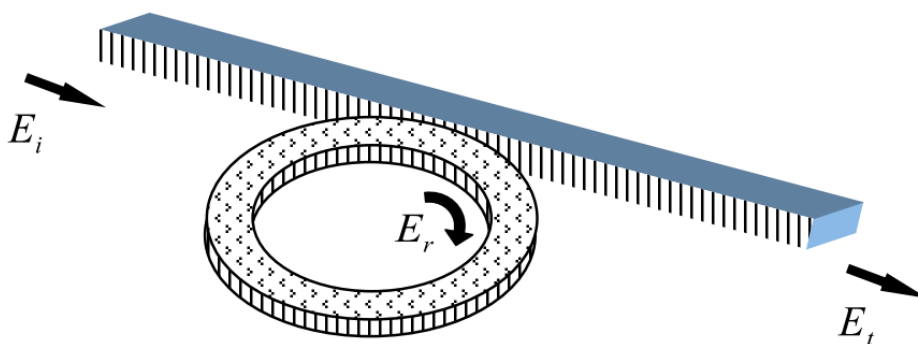
تشدیدگرهای حلقه‌ای مجتمع برای نخستین بار توسط مارکاتیلی در سال ۱۹۶۹، مطرح شد [۲]. اولین تشدیدگر حلقه‌ای نوری در سال ۱۹۷۱ توسط وبر و اولریچ ساخته شد [۵، ۶ و ۷].

تشدیدگر میکرو حلقه یک موجبر اپتیکی است که ابتدا و انتهای آن به همدیگر وصل شده و به صورت حلقه درآورده شده است. معمولاً قطر چنین ساختارهایی در حد میکرومتر است. امواج بازتاب یافته درون میکرو حلقه می‌توانند تداخل سازنده یا ویرانگر داشته باشند. میکرو حلقه برای استفاده باید با یک موجبر جفت شود. نور می‌تواند از طریق پدیده‌ی تونل‌زنی کوانتومی از یک یا چند موجبر مستقیم یا موجبرهای حلقه‌ای دیگر، به درون حلقه وارد شود یا از آن بیرون آید [۸].

۲-۲- نظریه‌ی میکروحلقه

ساده‌ترین راه برای بررسی مسئله‌ی میکروحلقه، مدل یک بعدی است. در این مدل ضخامتی برای میکروحلقه در نظر نمی‌گیرند و آن را به صورت یک رشته یا تار فرض می‌کنند [۹]. مدل یک بعدی با فرض وجود فرکانس‌های تشدید یا مدهای نوسانی طولی، می‌تواند بسیاری از خواص میکروحلقه‌ها را توضیح دهد. تاکنون در به‌کارگیری میکروحلقه‌ها از همین مدل استفاده شده است. برای استفاده از میکروحلقه وسیله‌ی دیگری نیاز است که میدان الکترومغناطیسی را به درون آن و یا از درون آن به بیرون هدایت کند. این وسیله یک موجبر مستقیم می‌باشد که در کنار حلقه قرار می‌گیرد، تا با استفاده از جفت شدگی میدان بین این موجبر و حلقه، میدان را به درون آن بفرستد و یا از آن خارج کند. بسته به نوع نیاز، ترکیب‌های متفاوتی از میکروحلقه‌ها و موجبرهای مستقیم می‌سازند، گاهی آن را با یک و گاهی با دو موجبر جداگانه در کنار آن می‌سازند.

در شکل (۱-۲) یک میکروحلقه و یک موجبر مستقیم که از طریق جفت‌شدگی جانبی به هم مرتبط شده‌اند، E_i وارد موجبر مستقیم می‌شود. بخشی از آن، E_r ، وارد میکروحلقه می‌گردد و بخش دیگر E_t ، از انتهای موجبر خارج می‌شود. میدان داخل حلقه در یک فرایند پس‌خوراند مثبت مرتباً قوی‌تر می‌شود. هنگامی که میدان E_i برهم‌نهی چند موج در طول موج‌های مختلف باشد، تمام میدان E_i در داخل حلقه تشدید نمی‌شود، بلکه حلقه تنها طول‌موج‌های خاصی از میدان E_i را انتخاب می‌کند.



شکل ۱-۲: میکروحلقه جفت شده با موجبر

وقتی مدهای اپتیکی در دو موجبر، هم‌پوشانی می‌کنند، توان از یک مد به مد دیگر منتقل می‌شود. به دلیل ساختار بسته، میکروحلقه مانند یک تشدیدگر عمل می‌کند و نور

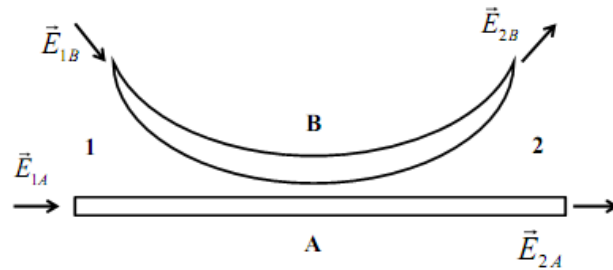
تنها در فرکانس‌های خاصی درون حلقه تقویت می‌شود. فرکانس‌های تشدید میکرو حلقه تحت شرایط خاصی تعیین می‌شوند. طول یک دور گردش نور در حلقه باید مضرب صحیحی از طول موج نور باشد:

$$m\lambda_m = Ln_{eff} \quad (1-2)$$

به طوری که λ_m طول موج مد طولی، L محیط و n_{eff} ضریب شکست مؤثر مد اپتیکی در موجبر حلقه‌ای است. در حالت تشدید، شدت نور در حلقه چندین برابر از شدت نور در موجبر بزرگتر است.

۱-۲-۲- ناحیه جفت‌شدگی

جفت‌شدگی تشدیدگر حلقه‌ای به وسیله‌ی هندسه‌ی ناحیه جفت‌شدگی تعیین می‌شود. شکل زیر نشان دهنده‌ی جفت‌شدگی بین دو موجبر است.



شکل ۲-۲: ناحیه جفت‌شدگی

در ناحیه‌ی جفت‌شدگی چهار درگاه اساسی وجود دارد. اگر دو تا از درگاه‌ها را به عنوان ورودی و دو تا را به عنوان خروجی در نظر بگیریم، برای ارتباط میدان‌های ورودی و خروجی ماتریس 2×2 را به عنوان تابع تبدیل تعریف می‌کنیم. با در نظر گرفتن میدان الکتریکی به صورت $\vec{E} e^{i\omega t}$ که \vec{E} (دامنه‌ی میدان) مختلط است، می‌توان میدان‌ها را در ناحیه جفت‌شدگی توسط ماتریس تبدیل زیر به هم مرتبط کرد:

$$\begin{pmatrix} \vec{E}_{2A} \\ \vec{E}_{2B} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{E}_{1A} \\ \vec{E}_{1B} \end{pmatrix} \quad (2-2)$$

مؤلفه‌های ماتریس تبدیل را می‌توان با استفاده از شرط قانون بقای انرژی، به دست آورد. اگر درون ناحیه جفت‌شدگی اتلافی در نظر گرفته نشود، توان ورودی با توان خروجی برابر می‌شوند:

$$\vec{E}_1^T \cdot \vec{E}_1^* = \vec{E}_2^T \cdot \vec{E}_2^* = [M \cdot \vec{E}_1]^T \cdot M^* \cdot \vec{E}_1^* = \vec{E}_1^T \cdot [M^T \cdot M^*] \cdot \vec{E}_1^* \quad (3-2)$$

از معادله‌ی (۳-۲) خواهیم داشت:

$$M^T \cdot M^* = 1 \quad (4-2)$$

از معادله‌ی (۴-۲) نتیجه می‌شود که ماتریس M ماتریسی یکانی است. با نوشتن معادله‌ی (۴-۲) بر حسب مؤلفه‌های ماتریسی داریم:

$$\begin{aligned} |m_{11}|^2 + |m_{21}|^2 &= 1, \\ |m_{22}|^2 + |m_{12}|^2 &= 1, \\ m_{11}^* m_{12} + m_{21}^* m_{22} &= 0 \end{aligned} \quad (5-2)$$

برای هر ماتریس یکانی $|\det(M)| = 1$ است. شرط اصلی که می‌توان برای دو مد منتشر شونده در موجبرها اعمال کرد، یکانی بودن ماتریس تبدیل است. با اعمال این شرط خواهیم داشت [۱۰]:

$$\det(M) = 1 \Rightarrow m_{11} m_{22} - m_{12} m_{21} = 1 \quad (6-2)$$

از معادله‌های (۵-۲) و (۶-۲) می‌توان نشان داد که:

$$\begin{aligned} m_{11} &= m_{22}^*, \\ m_{12} &= -m_{21}^*, \\ |m_{11}|^2 + |m_{12}|^2 &= 1 \end{aligned} \quad (7-2)$$

پس ماتریس جفت‌شدگی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$M = \begin{pmatrix} t & k \\ -k^* & t^* \end{pmatrix} \quad (8-2)$$

به طوری که t ضریب عبور مؤثر انتقال میدان و k ضریب جفت‌شدگی مؤثر میدان است. قانون بقای انرژی به وسیله‌ی آخرین تساوی معادله (۷-۲) به صورت زیر به دست می‌آید:

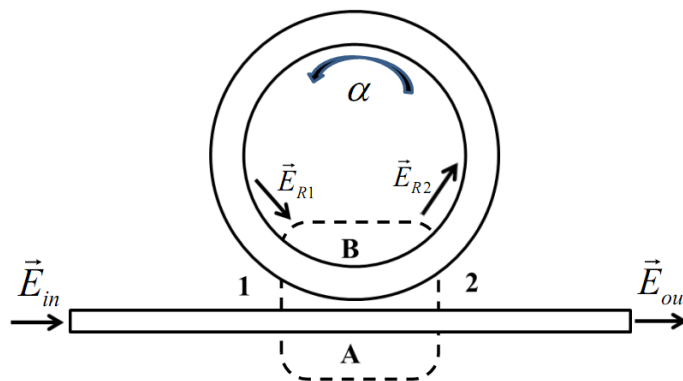
$$|t|^2 + |k|^2 = 1 \quad (9-2)$$

با این فرض که طول فیزیکی ناحیه جفت‌شدگی صفر است. نوری که در موجبر A از درگاه ۱ به ۲ بین ورودی و خروجی منتقل می‌شود، در فاز آن تغییری ایجاد نمی‌شود و این نشان می‌دهد که ضریب انتقال میدان می‌تواند عدد حقیقی باشد. فاز جفت‌شدگی از یک موجبر به موجبر دیگر به اندازه π تغییر می‌کند [۱۰]. از این رو ضریب جفت‌شدگی را به صورت $-ik$ می‌نویسند که k یک عدد حقیقی است. ماتریس تبدیل برای ناحیه جفت‌شدگی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$M = \begin{pmatrix} t & -ik \\ -ik & t \end{pmatrix} \quad (۱۰-۲)$$

۲-۲-۲- شدت درون تشدیدگر و تابع تبدیل

با استفاده از ماتریس جفت‌شدگی که در قبل به دست آمد، می‌توان تابع تبدیلی برای تشدیدگر حلقه‌ای به دست آورد و از روی آن شدت در تشدید را حساب کرد. در شکل (۳-۲) جفت‌شدگی موجبر و تشدیدگر دیده می‌شود، ناحیه‌ی جفت‌شدگی به صورت نقطه چین مشخص شده است.



شکل ۳-۲: ناحیه جفت‌شدگی در میکرو حلقه جفت شده به موجبر

نور به صورت میدان \vec{E}_{in} وارد موجبر می‌شود، در ناحیه جفت‌شدگی به اندازه $-ik\vec{E}_{in}$ به میکرو حلقه جفت می‌شود، پس از پیمودن محیط میکرو حلقه (\vec{E}_{R1}) به میزان $t\vec{E}_{R1}$ دوباره به میکرو حلقه وارد می‌شود، با توجه به شکل (۳-۲) معادله‌ها به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$E_{R2} = -ikE_{in} + tE_{R1} \quad (۱۱-۲)$$

$$E_{R1} = \alpha E_{R2} \exp(-i\beta L) \quad (12-2)$$

در این رابطه L طول میکرو حلقه، β ثابت انتشار و α ضریب اتلاف در واحد طول در یک دور چرخش نور است. با جایگزینی دو معادله (11-2) و (12-2) معادله‌ی زیر به دست می‌آید:

$$E_{R1} = E_{in} \frac{-ik}{1 - \alpha t \exp(-i\beta L)} \quad (13-2)$$

با داشتن دامنه میدان، شدت داخل میکرو حلقه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$I_R = I_{in} \frac{k^2}{1 + \alpha^2 t^2 - 2\alpha t \cos(\beta L)} \quad (14-2)$$

میدان الکتریکی خروجی از موجبر به صورت معادله‌ی زیر است:

$$E_t = -ikE_{R1} + tE_{in} \quad (15-2)$$

با استفاده از معادله‌های (13-2) و (15-2) می‌توان رابطه‌ی بین میدان‌های الکتریکی خروجی و ورودی به موجبر را به شکل زیر نوشت:

$$E_t = E_{in} \frac{t - \alpha \exp(-i\beta L)}{1 - \alpha t \exp(-i\beta L)} \quad (16-2)$$

در نتیجه رابطه‌ی بین شدت‌های ورودی و خروجی به صورت زیر خواهد بود:

$$I_R = I_{in} \frac{t^2 + \alpha^2 - 2\alpha t \cos(\beta L)}{1 + \alpha^2 t^2 - 2\alpha t \cos(\beta L)} \quad (17-2)$$

دو معادله‌ی (14-2) و (17-2) شدت نور جفت شده از میکرو حلقه به موجبر را بیان می‌کنند.

۲-۳- ویژگی‌های تشدیدگر میکرو حلقه

۱- انبارش میدان

انبارش میدان^۱، به صورت نسبت بزرگی میدان چرخشی داخل میکرو حلقه به میدان ورودی در حالتی که میکرو حلقه شرط تشدید را برآورده می‌کند، تعریف می‌شود. شرط تشدید زمانی برآورده می‌شود که فاز میدان چرخشی داخل میکرو حلقه، مضرب صحیحی از 2π باشد. به عبارت دیگر

¹ Field Enhancement (FE)