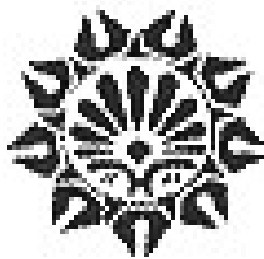


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
مَنْ كَانَ فِي حَرْبٍ مَعَهُ نَسْرَةٌ  
مِنْ كِتَابِ اللَّهِ فَليُقَاتِلْ فِي سَبِيلِ اللَّهِ  
لَعَلَّه يَرْجِعَ إِلَى اللَّهِ يَحْتَسِبُ  
وَلَعَلَّه يَكْفُرُ بِهِ كَمَا كَفَرُوا  
بِاللَّهِ قَبْلَ ذَلِكَ وَلَئِنْ لَمْ  
يَكُنْ فِي حَرْبٍ مَعَهُ نَسْرَةٌ  
وَلَمْ يَكُنْ فِي حَرْبٍ مَعَهُ  
مَالٌ فَلْيَصِلْ إِلَى اللَّهِ  
يَحْتَسِبُ



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

**دانشگاه تفرش**

گروه فیزیک

**پایان نامه کارشناسی ارشد**

**طراحی موجبر بلور فوتونی کاربردی در  
چرخشده های اپتیکی مجتمع**

**استاد راهنما:**

دکتر حمید رضا دهقان پور

**استاد مشاور:**

مهندس حسین علیصفایی

**دانشجو:**

سیده مریم مولوی عرب شاهی

۱۳۹۰

# دانشگاه تفرش

گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

## طراحی موجبر بلور فوتونی کاربردی در چرخشده های اپتیکی مجتمع

استاد راهنما :

دکتر حمید رضا دهقان پور

استاد مشاور :

مهندس حسین علیصفایی

دانشجو :

سیده مریم مولوی عرب شاهی

## تشکر و قدردانی

با سپاس فراوان از استاد راهنما گرامی جناب دکتر حمید رضا دهقان پور و مشاور گرامی آقای حسین علیصفایی که مرا در اجراء این پروژه یاری نموده اند .

pdfMachine

**A pdf writer that produces quality PDF files with ease!**

Produce quality PDF files in seconds and preserve the integrity of your original documents. Compatible across nearly all Windows platforms, simply open the document you want to convert, click "print", select the "Broadgun pdfMachine printer" and that's it! Get yours now!

## چکیده

در این پایان نامه تلاش شده است که بر روی یک قطعه مجتمع بسیار مهم به نام چرخشده نوری (Optical Circulator) که در مخابرات تار نوری کاربرد دارد پژوهش نظری انجام شود. بعد از مرور کاربرد های این قطعه و تشریح فیزیکی نحوه ی عملکرد آن به مرور مفاهیم پایه برای طراحی یک نمونه از این قطعات خواهیم پرداخت. مفاهیم اساسی مورد استفاده در این پایان نامه شامل مگنتوایپتیک و بلورهای فوتونی هستند. در مگنتوایپتیک از اثر بی بازگشتی نور و هندسه های مختلف بر همکنش نور با ماده صحبت خواهد شد و در بلورهای نوری نیز از مفهوم گاف نوری و حالت نقص نقطه ای و خطی استفاده خواهد شد.

ساختار چرخشده مورد نظر از یک کاواک نوری و سه موجبر تک مد به عنوان درگاه های ورودی و خروجی نور تشکیل میشود. به منظور طراحی این قطعه، در ابتدا از روش نظریه ی جفت شدگی مدی زمانی استفاده خواهد شد، که به بررسی نحوه ی جفت شدگی نور بین کاواک و درگاههای نوری می پردازد. در گام اول مسئله برای حالت عمومی حل خواهد شد و سپس به مسئله ی مورد نظر ما تخصیص داده خواهد شد. سپس با استفاده از پارامترهای بلورهای نوری به طراحی کاواک و موجبر خواهیم پرداخت، که در آن یک شبکه ی مثلثی از حفره های هوا در گارنت بیسموت آهن (Bi:YIG یا BIG) را به کار خواهیم گرفت. با بررسی نحوه ی جفت شدگی مدهای کاواک به یک الگوی مطلوب برای طرح دادن به حوزه های مغناطیسی ماده ی BIG دست خواهیم یافت و سپس با انجام شبیه سازی توسط نرم افزار OptiFDTD محاسبات نظریه را انجام خواهیم داد.

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

### فصل اول: مروری بر مفاهیم پایه

۱-۱-۱	مقدمه	۱
۱-۲-۱	کاربردهای سیرکولاتور	۱
۱-۳-۱	مگنتوآپتیک	۲
۱-۳-۱-۱	کشف اثر مگنتوآپتیک	۲
۱-۳-۱-۲	منشا اثر مگنتوآپتیک	۲
۱-۳-۱-۳	اثرات مگنتوآپتیکی	۳
۱-۳-۱-۴	اثر فارادی	۳
۱-۳-۱-۲	اثر فویت	۴
۱-۳-۱-۳	اثر کوتون-موتون	۴
۱-۳-۱-۴	اثر مگنتوآپتیک کر	۴
۱-۳-۱-۴	مبانی نظری مگنتوآپتیک	۷
۱-۳-۱-۴-۱	مدهای نرمال	۷
۱-۳-۱-۴-۲	قطبش نور	۸
۱-۳-۱-۵	مواد مگنتو اپتیکی	۱۰
۱-۳-۱-۴	قطعات بی بازگشت	۱۱
۱-۳-۱-۵	بلور فوتونی	۱۲
۱-۳-۱-۶	بلورهای فوتونیکی مگنتو اپتیکی	۱۴

### فصل دوم: بررسی جفت شدگی مگنتوآپتیکی بین مدهای نقصان

۲-۱-۱	مقدمه	۱۵
۲-۲-۱	نظریه اختلال و جفت شدگی مگنتوآپتیکی	۱۵
۲-۳-۱	دامنه های مغناطیسی برای جفت شدگی حد اکثر	۱۹
۲-۴-۱	جفت شدگی مگنتوآپتیکی در کاواک های چندمدی	۲۱

### فصل سوم: سیرکولاتورهای اپتیکی

۳-۱-۱	مقدمه	۲۲
۳-۲-۱	تحلیل جفت شدگی زمانی مدی	۲۲
۳-۳-۱	چرخشده های سه درگاه	۲۵

### فصل چهارم: طراحی بلور فوتونی دو بعدی

۴-۱-۱	مقدمه	۲۹
۴-۲-۱	اجزای سازنده ساختار چرخشده	۲۹
۴-۲-۱	محیط باند گاف	۲۹

pdfMachine

A pdf writer that produces quality PDF files with ease!

Produce quality PDF files in seconds and preserve the integrity of your original documents. Compatible across nearly all Windows platforms, simply open the document you want to convert, click "print", select the "Broadgun pdfMachine printer" and that's it! Get yours now!

۳۴	..... ۲-۲-۴ موجبر تک مد
۳۵	..... ۳-۴ طراحی سیستم تشدید گر در بلور فوتونی دو بعدی
۳۵	..... ۱-۳-۴ شعاع حفره های هوا
۳۶	..... ۲-۳-۴ جفت شدگی موجبر-کاواک
۳۹	..... ۴-۴ چرخشده های سه درگاه
۴۱	..... ۵-۴ شبیه سازی
۴۸	..... ۶-۴ جمع بندی
۴۹	..... پیشنهادات
۵۰	..... مراجع

## فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱- تصویر مایکل فارادی که در دست راست خود لوله شیشه‌ای آزمایش اثر فارادی خود را نگه داشته است..... ۲
- شکل ۲-۱- تصویر جان کر..... ۵
- شکل ۳-۱: هندسه سه نوع اثر MOKE..... ۶
- شکل ۴-۱- شماتیک چیدمان اندازه‌گیری اثر کر..... ۶
- شکل ۵-۱- بیضی قطبش نور..... ۹
- شکل ۶-۱- نمونه‌هایی از تناوب در ابعاد مختلف..... ۱۲
- شکل ۷-۱- گاف نوری نوعی یک بلور فوتونی یک‌بعدی..... ۱۳
- شکل ۸-۱- طیف چگالی حالات در بلور فوتونی. نوار گاف نوری و مد نقص در شکل نشان داده شده است..... ۱۳
- شکل ۱-۲- (a) ساختار نقصان دار در بلور فوتونی. بلور شامل شبکه مثلی از حفره‌های هوا با شعاع  $a = 0.35$  و با ضریب دیالکتریک  $6.25$  می‌باشد. ساختار نقیصه‌های با کاهش شعاع تک حفره هوا ایجاد می‌شود. (b) فرکانس مدهای نقیصه‌های به صورت تابعی از شعاع حفره‌های هوای مرکزی در ناحیه نقیصه‌های برای فوتونیک کریستال دو بعدی بیسموت-آهن- گارنت..... ۱۶
- شکل ۲-۲- شکل رنگی توزیع میدان HZ از مدهای دو قطبی دوگانه واگن را در یک کاواک فوتونیک کریستال BIG (که در شکل ۱-۲ نشان داده شده بود) نشان می‌دهد. رنگهای آبی و قرمز نشان دهنده مقادیر مثبت و منفی است. بردار، موقعیت میدان E را نشان می‌دهد..... ۱۷
- شکل ۳-۲- (بالا) حاصلضرب برداری میدان های الکتریکی دو مد نشان داده شده در شکل ۲-۲. (پایین) الگوی ناحیه‌های متناظر که ثابت جفتشدگی مگنتواپتیکی را بیشینه می‌سازد..... ۲۰
- شکل ۴-۲- میزان جفت شدگی مغناطیسی در کاواک فوتونیک کریستال سیلیکونی بر حسب تابعی از شعاع BIG..... ۲۰
- شکل ۵-۲- فرکانس مدهای نقیصه‌های بر حسب تابعی از شعاع BIG مرکزی در ناحیه نقصان از یک فوتونیک کریستال سیلیکونی دو بعدی. (b) مد هشت قطبی در کاواک سیلیکونی با شعاع  $rBIG = 0.4 a$ . (c) حاصلضرب برداری مقید از این مد هشت قطبی با مد زوج در نمودار  $2a$ . (d) حاصلضرب برداری مقید از مد هشت قطبی با مد فرد در نمودار  $2b$ . شعاع شش حفره نزدیک به مرکز نقیصه تا  $0.3a$  کاهش داده می‌شود تا مدهای دو قطبی به سمت مرکز گاف سوق داده شوند..... ۲۱
- شکل ۱-۳- طراحی از یک سیستم تشدیدگر اپتیکی جفت شده با پورت های چند گانه. پیکان ها موج های ورودی و خروجی را نشان می دهند. نقاط خط چین صفحات مرجع مربوط به دامنه های موج در پورت ها را نشان می دهد..... ۲۲
- شکل ۲-۳- طراحی از یک سیرکولاتور با سه پورت و نقطه اتصال Y شکل. پیکان های مستقیم موج های ورودی و خروجی را نشان می دهد و پیکان های خمیده دو حالت چرخنده در خلاف جهت یکدیگر در رزوناتور را نشان می دهند..... ۲۵
- شکل ۳-۳- انتقال ایده آل (پورت های خروجی و ایزوله شده) و طیف بازتابی از پورت سوم سیلکولاتور (پورت ورودی). مد های ساعتگرد و پادساعتگرد با پهنای خط یکسان  $\gamma_0$  به ترتیب در  $\omega_+ = \gamma_0 / \sqrt{3}$  و  $\omega_- = -\gamma_0 / \sqrt{3}$  تشدید می شوند..... ۲۷
- شکل ۴-۳- نسبت ایزولاسیون ( $I_{isolated} / I_{output}$ ) پورت سوم ایزولاتور که در فرکانس  $\omega_0$  دارای کارایی ایده آلی به صورت تابعی از انحراف فرکانسی موثر از  $\omega_0$  است ( $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ )..... ۲۷



شکل ۵-۳- توان بازتابی از پورت ورودی یک ایزولاتور سه پورته ایده آل که در فرکانس  $\omega_0$  دارای کارایی ایده‌آلی به صورت تابعی از انحراف فرکانسی موثر از  $\omega_0$  است. نمودار بازتابی با توان نشت کرده در پورت ایزوله یکسان است ..... ۲۸

شکل ۶-۳- طیف عبوری از تشدیدگرهای دوطرفه و غیر دو طرفه با سه پورت و تقارن چرخشی سه گانه. منحنی قرمز رنگ به دلیل تقارن آینه ای هر دو مقدار T1-2 و T2-1 را نشان می دهد. .... ۲۸

شکل ۱-۴- شبکه ای مربعی از میله های دی الکتریکی در هوا..... ۳۰

شکل ۲-۴- نقشه گاف شبکه مربعی از ستون های دی الکتریک با ثابت دی الکتریکی  $11/4$ ..... ۳۱

شکل ۳-۴- نقشه گاف شبکه مربعی از حفره های هوا در ماده دی الکتریک با ثابت دی الکتریکی  $11/4$ ..... ۳۲

شکل ۴-۴- نقشه گاف شبکه مثلثی از ستون های دی الکتریک با ثابت دی الکتریکی  $11/4$ ..... ۳۲

شکل ۵-۴- نقشه گاف شبکه مثلثی از حفره های هوا در ماده دی الکتریک با ثابت دی الکتریکی  $11/4$ ..... ۳۳

شکل ۶-۴- نماهای سه بعدی و تصاویر میکروسکوپی از ساختارهای بلور فوتونی دو بعدی ..... ۳۳

شکل ۷-۴- ساختار موجبری که با تغییر یک ردیف از حفره های هوا در بلور فوتونی تولید شده است. الف) موجبر با ضریب شکست کاهش یافته. ب) موجبر با ضریب شکست افزایش یافته ..... ۳۴

شکل ۹-۴- دایره ها نشانگر اندازه حفره هوایی می باشد و بیشینه اندازه نسبی نواز گاف (منحنی خط چین) را برای اولین نوار گاف در شبکه مثلثی از حفره های هوا ( به ازای ثابت های دی الکتریک به کار رفته در موادی با ضریب دی الکتریک بالا) نشان می دهد..... ۳۵

شکل ۱۰-۴- نموداری از تک مد موجبر در یک فوتونیک کریستال. کریستال از آرایه های مثلثی از حفره های هوا با شعاع  $r = 0.35a$  در ماده ای با ضریب دی الکتریک بالا  $\epsilon = 6.25$  شکل گرفته است و موجبر شامل ردیفی از حفره های بزرگ هوا با شعاع  $r = 0.55a$  است. .... ۳۶

شکل ۱۱-۴- فرکانس و فاکتور کیفیت مربوط به کاواک تک نقص که با استفاده از شبیه سازی FDTD محاسبه شده است. (a) در سلول محاسبه، دایره های مشکی نشانگر محل حفره های هوا می باشد؛ کاواک با از حذف کردن یک حفره هوا ایجاد می شود و موجبر از ردیفی از حفره های بزرگ هوا با شعاع  $r = 0.55a$  تشکیل شده است. (b) فرکانس و فاکتور کیفیت مربوط به مد نقص ای که به صورت تابعی از فاصله کاواک-موجبر نشان داده شده است. .... ۳۷

شکل ۱۲-۴- الگوی میدان مغناطیسی مربوط به مد دو قطبی در یک ساختار نقص ای که با از دست دادن یک از حفره های هوا شکل گرفته است. ساختار کاواک با نمودار شکل ۱۱-۴ مطابقت دارد..... ۳۸

شکل ۱۳-۴- فرکانس ها و فاکتور کیفیت (Q) مربوط به مدهای دو قطبی دوگانه واگن که به صورت تابعی از تغییر مکان محوری موجبر نمایش داده شده است. موجبر ها به طور سمتی به اندازه دو ردیف جابجا داده شده اند..... ۳۸

شکل ۴-۱۴- طیف عبوری در پورت های خروجی و ایزوله شده از یک سیرکولاتور با اتصال سه پورت ( که در شکل داخلی نشان داده شده است). سیرکولاتور از طریق جفت شدگی نقطه نقص با سه موجبر ساخته شده است. دایره ها نیز برابر حفره های هوا در بیسموت- آهن-گانت می باشند. نوحی روشن و خاکستری تاریک نشاندهنده حوزه های مغناطیسی با جهت مغناطیسی مخالف خارج از سطح می باشند. طیف FDTD (نقاط) تطابق خوبی با تحلیل تئوری جفت شدگی ( منحنی های پیوسته) دارد. شکل الحاقی به نمودار فوق نیز طرح شماتیکی از یک سیرکولاتور با اتصال Y شکل سه پورته میباشد. پیکانهای مستقیم موجهای ورودی و خروجی را نشان میدهد و دو پیکان خمیده نیز مدهای چرخنده در خلاف جهت یکدیگر در رزوناتور را نشان می دهد.....۳۹

شکل ۴-۱۵- الگوهای مربوط به میدان خارج از سطح H از یک سیرکولاتور با اتصال سه پورت، هنگامی که در  $\omega = 0.3468$  تحریک شده است. رنگهای آبی و قرمز مقادیر بزرگ مثبت و منفی را نشان می دهد.....۴۰

شکل ۴-۱۶.....۴۱

شکل ۴-۱۷.....۴۲

شکل ۴-۱۸.....۴۲

شکل ۴-۱۹.....۴۳

شکل ۴-۲۰.....۴۳

شکل ۴-۲۱.....۴۴

شکل ۴-۲۲.....۴۴

شکل ۴-۲۳.....۴۵

شکل ۴-۲۴.....۴۵

شکل ۴-۲۵.....۴۶

شکل ۴-۲۶.....۴۶

شکل ۴-۲۷.....۴۷

## پیشگفتار

ساخت قطعات مجتمع نوری نیازمند طراحی دقیق آنها برای کاربردهای مختلف می باشد. موجبرهای مجتمع که با استفاده از بلورهای فوتونی طراحی میشوند دارای پتانسیل بالایی به منظور استفاده در قطعات مجتمع نوری هستند. یکی از این قطعات که کاربرد فراوانی در مخابرات نوری دارد جبران ساز پاشندگی می باشد که از قسمت های مهم آن چرخشده اپتیکی را میتوان نام برد. هدف از اجرای این پایان نامه طراحی موجبرهای بلورفوتونی با کاربرد در چرخشده های اپتیکی مجتمع می باشد که برای باند C مخابراتی قابلیت استفاده خواهد داشت. با انجام موفقیت آمیز این پایان نامه امکان طراحی قطعه اصلی نیز بوجود خواهد آمد و نتایج بدست آمده موجب تسریع و تسهیل در طراحی سایر قطعات اپتیک مجتمع بر پایه موجبرهای بلورفوتونی خواهد بود.

این پایان نامه شامل بخش های زیر است.

در فصل اول به مرور مفاهیم پایه برای طراحی یک نمونه از این قطعات پرداخته می شود. مفاهیم اصلی مورد استفاده شامل مگنتو اپتیک و بلورهای فوتونی هستند.

در فصل دوم به طور نظری جفت شدگی مگنتو اپتیکی بین مدهای نقصان توسط رهیافت اختلالی بررسی میشود.

در فصل سوم ابتدا خلاصه ای از تئوری جفت شدگی مدی زمانی ارائه می شود و توسعه آن به سیستم بی بازگشت بحث میشود و سپس با استفاده از نظریه جفت شدگی زمانی به تحلیل شرایط همخوانی برای یک چرخشده ایده آل سه در گاهه که بر اساس دو مد تک و اگنه با چرخشهای مختلف ساخته شده است می پردازیم.

در فصل چهارم به نحوه طراحی ساختار چرخشده مورد نظر و نتایج پرداخته میشود.

# فصل اول

## مقدمه

### ۱ - ۱ - مقدمه

رشد چشمگیر تقاضای پهنای باند در شبکه‌های مخابراتی امروزی موجب نیاز به افزایش چگالی قطعات در شبکه‌های نوری شده است. در بین تلاش‌های مختلف مینیاتورسازی ادوات اپتیکی، قطعات اپتیکی بی‌بازگشت، مانند ایزولاتورها<sup>1</sup> و سیرکولاتورها<sup>2</sup> (چرخنده)، بسیار مورد توجه می‌باشند.

### ۱ - ۲ - کاربردهای سیرکولاتور

سیرکولاتور وسیله‌ای است یکسوساز<sup>3</sup> که اجازه چرخش نور از یک فیبر نوری<sup>4</sup> به فیبر نوری دیگری دهد اساس این سیرکولاتور بر مبنای جهت انتشار نور است. یکسو کننده‌هایی مانند ایزولاتورها و سیرکولاتورها اجزای ضروری برای سیستم‌های ارتباط نوری هستند. سیرکولاتورهای اپتیکی قادر به چرخاندن نور از یک فیبر نوری یا موجبر به فیبر نوری دیگر یا موجبر دیگری می‌باشند که اساس کار آنها بر مبنای چرخش نور است. هر سیرکولاتور حداقل سه پورت اپتیکی دارد و بر اساس فرمان داده شده به سیرکولاتور، هر پورت وظیفه خاصی دارد بدین صورت که وقتی نور از یک پورت وارد می‌شود و از درون سیرکولاتور عبور می‌کند از پورت کناری بیرون می‌رود برای مثال از پورت ۱ وارد شده و از پورت ۲ خارج می‌شود نور بعدی که از پورت ۲ وارد شده از پورت ۳ خارج می‌شود از آنجاییکه سیرکولاتورها وسایل یکسوساز هستند به همین دلیل نور هیچوقت از پورت دیگری خارج نمی‌شود. سیرکولاتورهای اپتیکی کاربردهای گسترده‌ای دارند.

- تبدیل لینک ارتباط فیبر اپتیکی یکسوبه یک لینک ارتباطی دو سوئی با استفاده از نصب سیرکولاتور در انتهای هر لینک
- سیرکولاتورهای اپتیکی به عنوان سیستم‌های تقویت کننده فیبر ناقص
- شبکه‌های تقسیم طول موج
- بازتاب سنح‌های منطقه زمانی اپتیک (OTDRs)<sup>5</sup>
- ابزار تست به کار می‌روند
- سیرکولاتورهای سه راهه رفتاری یکسو کننده برای انتقال امواج میکروویو دارند.

<sup>1</sup> Isolator

<sup>2</sup> Circulator

<sup>3</sup> Rectifier

<sup>4</sup> Optical fiber

<sup>5</sup> Optics time domain reflectometers



شکل ۱-۱- تصویر مایکل فارادی که در دست راست خود لوله شیشه‌ای آزمایش اثر فارادی خود را نگاه داشته است [۱].

### ۱-۳- مگنتوایپتیک

#### ۱-۳-۱- کشف اثر مگنتوایپتیک

در سال ۱۸۴۵، مایکل فارادی<sup>۶</sup> (شکل ۱-۱) مشاهده کرد که با عبور نور پلاریزه خطی از شیشه در همان جهتی که به آن میدان مغناطیسی اعمال شده است، صفحه قطبش نوری می‌چرخد [۱]. این اثر ارتباط میان مغناطیس و نور را اثبات کرد که آغاز مگنتوایپتیک را رقم زد.

#### ۱-۳-۲- منشا اثر مگنتوایپتیک

از لحاظ میکروسکوپی، جفت‌شدگی میان میدان الکتریکی نور و اسپین الکترون در ماده مغناطیسی از طریق برهمکنش اسپین-مدار رخ می‌دهد [۲]. خواص اپتیکی ماده توسط تانسور دی‌الکتریک آن تعیین می‌شود که آن نیز به نوبه خود توسط حرکت الکترون‌ها در ماده تعیین می‌شود. توصیف میکروسکوپی اثر مگنتوایپتیک بر اساس پاسخ‌های متفاوت الکترون‌ها به امواج الکترومغناطیسی راستگرد و چپگرد خواهد بود.

از لحاظ کلاسیکی، با گذر باریکه نوری از ماده، میدان الکتریکی نور باعث حرکت الکترون‌ها در ماده می‌شود. در غیاب میدان مغناطیسی خارجی، واضح است که میدان الکتریکی نور با قطبش چپگرد قادر است الکترون‌ها را به حرکت چپگرد، و میدان الکتریکی نور با قطبش راستگرد الکترون‌ها را به حرکت راستگرد وادارند. در این حالت، شعاع مدار الکترونی

<sup>6</sup> Faraday

حرکت‌های راستگرد و چپگرد برابر هستند. از آنجایی که ممان دوقطبی الکتریکی متناسب با شعاع مدار است، لذا اختلافی میان ضرایب دی‌الکتریکی برای امواج الکترومغناطیسی راستگرد و چپگرد وجود نخواهد داشت و در نتیجه چرخش فارادی دیده نخواهد شد. پس از اعمال میدان مغناطیسی خارجی در راستای موج الکترومغناطیسی، یک نیروی لورنتز اضافی بر هر الکترون وارد خواهد شد. این نیرو در جهت داخل یا خارج از مرکز دایره حرکت چپگرد و راستگرد خواهد بود. بنابراین، شعاع حرکت چپگرد کاسته می‌شود و شعاع حرکت راستگرد افزایش می‌یابد. اختلاف میان شعاع‌های این مدها منجر به اختلاف در ضرایب دی‌الکتریکی آنها می‌شود. پس، این نیروی لورنتز میدان مغناطیسی خارجی است که اثر فارادی را تولید می‌کند.

### ۱-۳-۳- اثرات مگنتوآپتیکی

#### ۱-۳-۳-۱- اثر فارادی

مایکل فارادی در سال ۱۸۴۵ کشف کرد که اگر یک قطعه شیشه تحت اعمال میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، از لحاظ اپتیکی فعال می‌شود [۱]. با عبور نور پلاریزه خطی به موازات میدان مغناطیسی اعمالی، صفحه قطبش نور می‌چرخد. زاویه چرخش صفحه قطبش،  $\theta$ ، متناسب است با اندازه میدان مغناطیسی  $H$  و مسافت  $L$  که توسط نور در داخل ماده در طول میدان طی شده است:

$$\theta = VHL \quad (1-1)$$

$V$  را ثابت وردت<sup>۷</sup> می‌نامند و بصورت چرخش بر واحد طول بر واحد شدت میدان تعریف می‌شود. ثابت وردت به خواص محیط، فرکانس نور، و دما،  $T$ ، وابسته است. علامت زاویه  $\theta$  بستگی به علامت  $H$  دارد. بنابراین اگر نور دو مرتبه در راستای میدان حرکت کند، یعنی یکبار در جهت میدان و سپس در خلاف جهت توسط یک آینه بازتاب شود، مقدار  $\theta$  دو برابر می‌شود. این خاصیت بیانگر تمایز اثر فارادی از اثر طبیعی فعالیت اپتیکی است که دومی نتیجه  $\theta = 0$  را بدست می‌دهد.

از دیدگاه پدیده شناسی، اثر فارادی را می‌توان توسط این واقعیت تشریح کرد که ضرایب شکست ماده مغناطیسی برای نور راستگرد  $n_+$  و چپگرد  $n_-$  هنگامی که در میدان مغناطیسی واقع می‌شود دارای تفاوت می‌شوند. در نتیجه نورهای با قطبش راستگرد و چپگرد با سرعت‌های متفاوتی،  $c/n_+$  و  $c/n_-$ ، در ماده منتشر می‌شوند. از آنجا که نور پلاریزه خطی را می‌توان بصورت برهم‌نهی نورهای راستگرد و چپگرد نمایش داد، چرخش فارادی بصورت زیر داده می‌شود:

$$\theta = \frac{\omega}{2c} (n_+ - n_-) L \quad (2-1)$$

که در آن  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای،  $c$  سرعت نور، و  $L$  مسافت طی شده توسط باریکه نوری در ماده است. اثر لارمور القایی مغناطیسی<sup>۸</sup> در مدارهای الکترونی را می‌توان ساده‌ترین مکانیسم برای اثر فارادی دانست [۲]. بدین ترتیب، بجای یک ویژه فرکانس الکترونی، دو ویژه فرکانس ( $\omega_+$ ,  $\omega_-$ ) وجود خواهند داشت که متناظر با نوسانات راستگرد و چپگرد خواهند بود. تئوری نشان می‌دهد که

$$\omega_{\pm} = \omega_0 \pm \frac{1}{2} \frac{e}{m} \frac{H}{c} \quad (3-1)$$

که در آن  $e$  و  $m$  به ترتیب بار و جرم الکترون هستند.

<sup>7</sup> Verdet Constant

<sup>8</sup> Magnetic-field-induced Larmor

ظهور دو فرکانس تشدید در محیطی که در میدان مغناطیسی قرار گرفته است موجب جدایی خطوط جذب می‌شوند. اختلاف میان فرکانس‌های تشدید در دوگانه زیمان<sup>۹</sup> موجب جابجایی نمودارهای  $n_+(\omega)$  و  $n_-(\omega)$  نسبت به یکدیگر می‌شود:

$$n_{\pm}(\omega) \approx n(\omega) \pm \frac{dn}{d\omega} \frac{eH}{2mc} \quad (۴-۱)$$

که در آن  $n(\omega)$  ضریب شکست ماده در غیاب میدان  $H$  است. با جایگذاری معادلات (۴-۱) و (۲-۱) در معادله (۱-۱)، رابطه معروف بکرل<sup>۱۰</sup> بدست می‌آید:

$$V = \frac{e}{2mc^2} \lambda \frac{dn}{d\lambda} \quad (۵-۱)$$

که در آن  $\lambda = 2\pi c / \omega$  طول موج نور است.

### ۳-۱-۳-۲- اثر فویت

در سال ۱۹۰۲ فویت<sup>۱۱</sup> کشف کرد هنگامی که میدان مغناطیسی به یک بخار اعمال شود که نور از آن بطور عمود بر میدان می‌گذرد، دوشکستی<sup>۱۲</sup> اتفاق می‌افتد. دلیل این دوشکستی، مرتب شدن مولکول‌های با ناهمسانگردی اپتیکی و مغناطیسی در جهت میدان اعمالی است.

اثر دوشکستی خطی مغناطیسی (MLB)<sup>۱۳</sup> یک اثر زوج نسبت به میدان است و معمولاً با شدت میدان تناسب توان چهار دارد. این موجب تغییرات بیضی‌گونگی<sup>۱۴</sup> نور پلاریزه دایروی می‌شود که از داخل ماده عبور می‌کند. اثر MLB مشاهده شده در مواد مغناطیسی در بسیاری از موارد قوی‌تر از اثرات خطی مگنتوآپتیکی (مانند اثر فارادی) است.

### ۳-۱-۳-۳-۱- اثر کوتون-موتون

اثری مشابه اثر فویت ولی قوی‌تر در سال ۱۹۰۷ توسط کوتون و موتون<sup>۱۵</sup> در مایعات کشف شد. آنها در محیط‌های مایعی مانند نیتروبنزن توانستند اثرات دو شکستی قوی‌ای را مشاهده کنند. در بلورهای مایعی<sup>۱۶</sup> که از مولکول‌های دیامغناطیس<sup>۱۷</sup> تشکیل شده‌اند و دارای ناهمسانگردی<sup>۱۸</sup> قوی در پذیرفتاری<sup>۱۹</sup> مغناطیسی هستند اثرات مگنتوآپتیکی قوی‌ای مشاهده شده است. با اینکه پذیرفتاری مغناطیسی بلورهای مایع نسبتاً ضعیف است، انرژی میدان مغناطیسی می‌تواند برای تغییر جهت مندی بلورمایع کافی باشد که این به دلیل خاصیت همکاری بلور مایع به میدان مغناطیسی خارجی است. سپس، در ساختار جهت‌مند بلورمایع، به دلیل ناهمسانگردی قوی اپتیکی مولکول‌ها در تغییر القایی مغناطیسی دوشکستی، تغییری ظاهر می‌شود. اثرات مگنتوآپتیکی بسیار قوی‌ای نیز با همین ویژگی‌ها در مایعات مغناطیسی مشاهده شده است.

<sup>9</sup> Zeeman doublet

<sup>10</sup> Becquerel

<sup>11</sup> Voigt

<sup>12</sup> Birefringence

<sup>13</sup> Magnetic Linear Birefringence

<sup>14</sup> Ellipticity

<sup>15</sup> Cotton and Mouton

<sup>16</sup> Liquid crystal

<sup>17</sup> Diamagnetic

<sup>18</sup> Anisotropy

<sup>19</sup> Susceptibility

## ۱-۳-۳-۴- اثر مگنتوآپتیک کر

ناهمسانگردی اپتیکی ماده مغناطیسی می‌تواند خود را در بازتاب نور از سطح ماده نیز نشان دهد. چنین پدیده‌هایی بطور عمومی به نام اثر مگنتوآپتیک کر<sup>۲۰</sup> (MOKE) شناخته می‌شوند. این اثر در سال ۱۸۷۷ توسط جان کر<sup>۲۱</sup> (شکل ۱-۲) هنگامی که بر روی نور بازتابی از انتهای پولیش شده یک الکترومگنت مطالعه می‌کرد، کشف شد [۴،۳]. این کشف منجر به بردن جایزه مدال سلطنتی<sup>۲۲</sup> برای او در سال ۱۸۹۸ شد که به عنوان با اهمیت‌ترین کارهای دنباله کارهای فارادی شناخته شده بود.

بسته به جهت‌گیری بردار مغناطش نسبت به سطح بازتابنده و صفحه فرود نور، می‌توان سه نوع MOKE را تمایز داد:

۱. قطبی

۲. طولی

۳. عرضی



شکل ۱-۲- تصویر جان کر [۳].

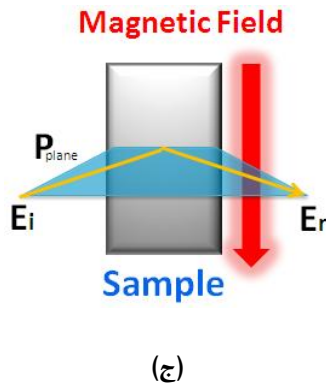
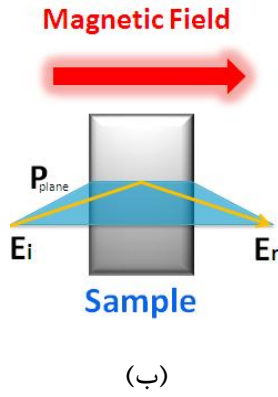
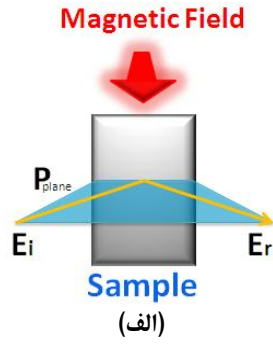
در MOKE قطبی، بردار مغناطش  $M$  بطور عمود بر سطح بازتاباننده و موازی با صفحه فرود نور است شکل (۱-۳ الف). هندسه MOKE طولی در شکل (۱-۳ ب) نشان داده شده است. تاثیر مغناطش در هر دوی این موارد بصورت چرخش صفحه قطبش نور و ظهور بیضی‌گونگی در نور بازتابیده می‌شود. ویژگی عمومی اثرات قطبی و طولی وجود یک مولفه غیر-صفر بردار موج الکترومغناطیسی در جهت مغناطش  $M$  است. اهمیت بسیار زیاد MOKE قطبی در کاربردهای ذخیره اپتیکی اطلاعات است و اساس کار بازخوانی اطلاعات از دیسک‌های مگنتوآپتیک.

<sup>20</sup> Magneto-optical Kerr Effect

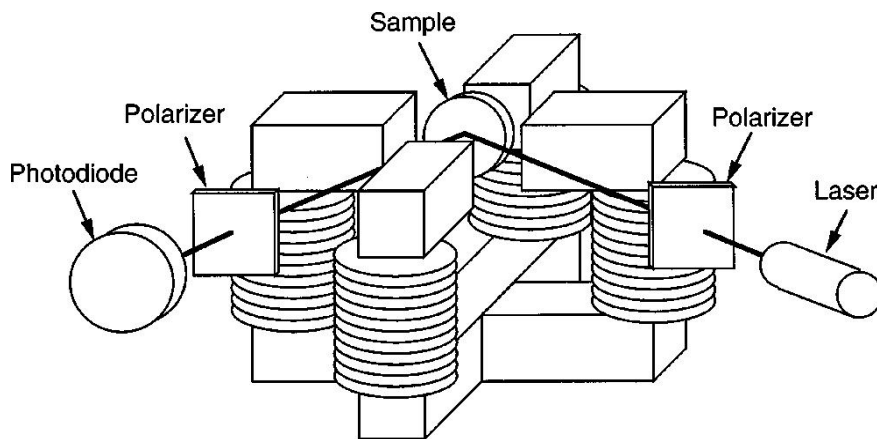
<sup>21</sup> John Kerr

<sup>22</sup> Royal Medal





شکل ۳-۱: هندسه سه نوع اثر MOKE [۳].



شکل ۴-۱- شماتیک چیدمان اندازه‌گیری اثر کر [۴].

هندس MOKE عرضی در شکل (۱-۳ج) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بردار مغناطش بطور عمودی نسبت به فرود نور جهت‌گیری داده شده است. نتیجه این اثر تغییر در شدت و فاز نور فرودی خطی است. این اثر برخلاف اثر کوتون-موتون یک اثر فرد نسبت به مغناطش است. بنابراین بطور گسترده در مطالعات مغناطیسی استفاده می‌شود به ویژه در مشاهده ناحیه‌های مغناطیسی<sup>۲۳</sup> در سطح مواد مغناطیسی. همچنین این اثر برای طراحی آینه‌های عرضی - مغناطیده استفاده می‌شود که در دستگاه‌های اپتیکی بازگشت ناپذیر<sup>۲۴</sup> بکار می‌روند. در شکل (۱-۴) نیز چیدمان نوعی اندازه‌گیری اثر کر نشان داده شده است. بطور عمومی، اثرات کر کوچکنند؛ برای مثال، زاویه کر قطبی برای فرود عمود بر آهن، کبالت و نیکل در محدوده نور مرئی نوعاً کمتر از یک دهم درجه است.

### ۱-۳-۴- مبانی نظری مگنتوآپتیک

#### ۱-۳-۴-۱- مدهای نرمال

در این بخش مروری بر الکترودینامیک مگنتوآپتیک می‌شود. از لحاظ نظری شروع کار با معادلات ماکسول است:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot E &= 4\pi\rho \\ \nabla \cdot B &= 0 \\ \nabla \times E &= -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times B &= \frac{1}{c} 4\pi j + \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t}\end{aligned}\quad (6-1)$$

و معادله پیوستگی نیز بکار گرفته می‌شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot j = 0 \quad (7-1)$$

با در نظر گرفتن خواص الکتریکی ( $P$ ) و مغناطیسی ( $M$ ) ماده در روابط میدان‌ها بصورت زیر:

$$\begin{aligned}H &= B - 4\pi M \\ D &= E + 4\pi P\end{aligned}\quad (8-1)$$

معادلات ماکسول بصورت زیر در خواهد آمد:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot D &= 0 \\ \nabla \cdot B &= 0 \\ \nabla \times E &= -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times H &= \frac{1}{c} \frac{\partial D}{\partial t}\end{aligned}\quad (9-1)$$

<sup>23</sup> Magnetic Domains

<sup>24</sup> Non-reciprocal

برای بدست آوردن مدهای نرمال میدان الکترومغناطیسی، با در نظر گرفتن وابستگی هارمونیک جواب‌های معادلات ماکسول بصورت

$$\exp[-i(\omega t - kr)] \quad (10-1)$$

معادله موج به شکل زیر در خواهد آمد:

$$-\nabla^2 E + \nabla \nabla \cdot E = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 D}{\partial t^2} \quad (11-1)$$

که از این رابطه می‌توان رابطه مدهای نرمال را بصورت زیر نوشت:

$$n^2 E - n(n \cdot E) = \varepsilon E \quad (12-1)$$

در رابطه بالا  $n = (c/\omega)k$  بردار شکست است. معادله (12-1) هنگامی جواب خواهد داشت که دترمینان ضرایب صفر شود:

$$\det \| n^2 \delta_{ik} - n_i n_k - \varepsilon_{ik}(\omega) \| = 0 \quad (13-1)$$

رابطه اخیر را معادله فرنل می‌نامند. این معادله بردارهای نرمال شکست را تعریف می‌کند. لازم به ذکر است که تانسور  $\varepsilon$  گذردهی الکتریکی ماده است و در حالتی ساده که محور  $z$  در راستای  $M$  باشد بصورت زیر خواهد بود:

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -ig & 0 \\ ig & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (14-1)$$

که در آن  $g$  بردار ژیراسیون<sup>۲۵</sup> است. پارامتر مگنتوآپتیکی فویت ( $Q$ ) بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q = g / \varepsilon_1 \quad (15-1)$$

که معمولاً  $1 \ll |Q|$ .

با استفاده از معادله (13-1) تا (15-1) برای ضریب شکست‌هایی که از حل معادله فرنل در حالات مختلف بدست می‌آیند خواهیم داشت:

الف) برای جهت‌گیری طولی ( $n // g$ ):

$$n^2 = \varepsilon_0 [1 \pm Q] \quad (16-1)$$

ب) برای جهت‌گیری عرضی ( $n \perp g$ ) مد TM خواهیم داشت:

$$n^2 = \varepsilon_0 [1 - Q^2] \quad (17-1)$$

### ۱-۳-۲-۴- قطبش نور

از آنجا که در اکثر کاربردهای مگنتوآپتیکی نور قطبیده استفاده می‌شود، در این بخش مروری بر این مورد مهم می‌شود. موج الکترومغناطیسی را می‌توان بصورت زیر توصیف کرد:

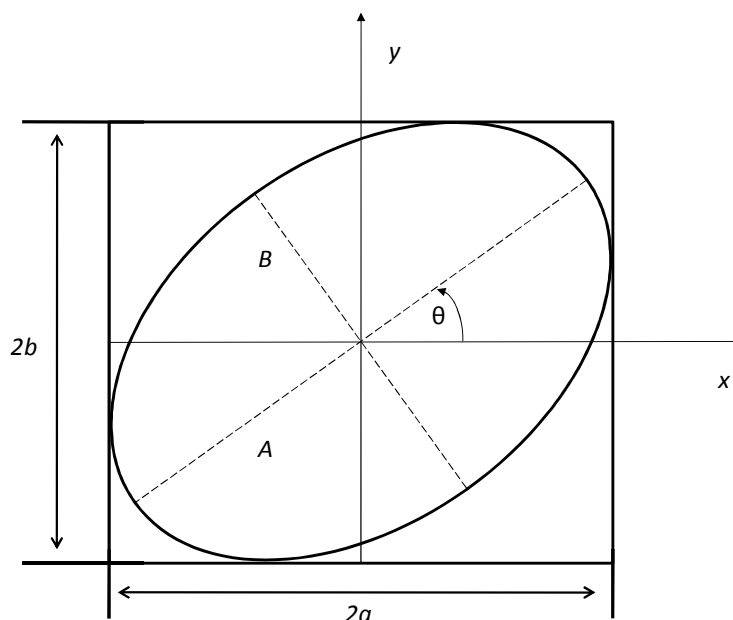
$$\begin{aligned} E(r,t) &= E_0 \exp[-i(\omega t - k \cdot r)] \\ B(r,t) &= B_0 \exp[-i(\omega t - k \cdot r)] \end{aligned} \quad (18-1)$$

<sup>25</sup> Gyration

که در آن  $k = n\omega/c$  است. با توجه به اینکه  $E$  و  $B$  بر یکدیگر عمود هستند برای مشخص کردن قطبش نور تنها یکی از آنها کافی است.

صفحه‌ای که توسط بردارهای  $B$  و  $k$  تعریف می‌شود را صفحه قطبش می‌نامند. در حالت عمومی نور بصورت بیضوی قطبیده است. در این مورد، بردار  $E$  موج انتشاری در صفحه‌ای که عمود بر انتشار است یک بیضی را توصیف می‌کند. این بیضی مستقیماً توسط معادلات موج الکترومغناطیس تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} E_x &= a \operatorname{Re}\{\exp[i\varphi(r,t)]\} \\ E_y &= b \operatorname{Re}\{\exp[i\varphi(r,t) - \delta]\} \end{aligned} \quad (19-1)$$



شکل ۱-۵- بیضی قطبش نور

که در آن  $a$  و  $b$  دامنه‌های حقیقی موج هستند و  $\varphi(r,t) = kr - \omega t$  این بیضی را دیاگرام قطبش یا بیضی قطبش موج الکترومغناطیس می‌نامند (شکل ۱-۵). جهت پیمایش بیضی دارای اهمیت ویژه است. اگر که رو به باریکه نور ایستاده باشیم (در خلاف جهت  $k$ )، بردار  $E$  می‌تواند ساعتگرد یا پاد ساعتگرد بچرخد. این موج‌ها را به ترتیب راستگرد و چپگرد می‌نامند. اختلاف میان این دو قطبش در مگنتوآپتیک بسیار مهم است زیرا هر یک بطور متفاوتی با محیط مغناطیسه برهمکنش می‌کند و سرعت‌های فاز متفاوتی دارند.

پارامترهایی که در ادامه به آنها اشاره می‌شود به طور عمومی در توصیف یک دیاگرام قطبش استفاده می‌شوند. زاویه  $\theta$ ، جهت‌مندی محور بزرگتر را از محور  $x$  مشخص می‌کند. این پارامتر را زاویه جهت‌مندی بیضی قطبش نور می‌نامند. زاویه بیضی‌گونگی  $\psi$  که بصورت زاویه بین محور بزرگتر بیضی و قطر مستطیل محاط‌کننده آن تعریف می‌شود. واضح است که  $-\pi/4 \leq \psi \leq \pi/4$  است. اگر  $\psi = 0$  باشد، نور پلاریزه خطی داریم. اگر  $\psi = \pm \pi/4$  آنگاه نور بصورت

دایروی پلاریزه است و داریم  $a=b$ .

در حالت کلی که پلاریزه بیضوی داریم می‌توانیم نور را بصورت برهنه‌ی موج‌های راستگرد و چپگرد بنویسیم. برای سادگی فرض می‌کنیم  $\theta = 0$ :