





دانشگاه کردستان
دانشکده علوم پایه
گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش حالت جامد

عنوان:

فشار میدان میرای موجبر روی یک فیلم نازک دی الکتریک

پژوهشگر:

دریا عظمی

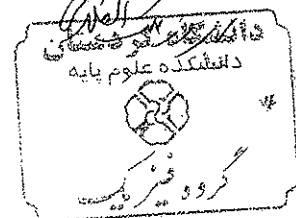
در تاریخ ۱۳۹۲/۱۲/۷ توسط کمیته تخصصی و هیات داوران زیر مورد بررسی قرار گرفت و با نمره ۱۹.۴ و درجه بسیار عالی به تصویب رسید.

امضاء	مرتبہ علمی	نام و نام خانوادگی	هیات داوران
	استادیار	دکتر عبدالله حسن زاده	۱- استاد راهنما
	استادیار	دکتر محمد رزاقی	۲- استاد داور خارجی
	استادیار	دکتر مسعود قطبی	۳- استاد داور داخلی

مهر و امضاء معاون آموزشی و تحصیلات تکمیلی

مهر و امضاء مدیر گروه

دانشکده





University of Kurdistan
Faculty of Basic Sciences
Department of Physics

A Thesis Submitted to the Postgraduate Studies Office in Partial Fulfillment
of the Requirements for the Degree of M.Sc.
in Solid State Physics

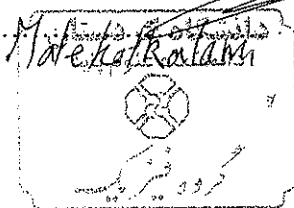
Title:
Waveguide Evanescent Field Pressure On A Thin Dielectric Film

By:
Darya Azami

The above thesis was evaluated and approved by the following members of the thesis committee
with mark 91.4 and excellent quality on

<u>Position</u>	<u>Title and Name</u>	<u>Signature</u>
1. Supervisor:	Assist. Prof. Abdollah Hassanzadeh	A. Hassanzadeh
2. External Examiner:	Assist. Prof. Mohammad Razzaghi	M. Razzaghi
3. Internal Examiner:	Assist. Prof. Masood Ghotbi	Masood Ghotbi

Head of Department:



Faculty Graduate Coordinator:

.....

تقدیم به...

ای پدر از تو هر چه می گویم باز هم کم می آورم
خورشیدی شدی و از روشنایی ات جان گرفتم و در ناامیدی ماندم را
کشیدی و لبریزم کردی از شوق

اکنون حاصل دستان خسته ات رمز موفقیتم شد

به خودم تبریک می گویم که تو را دارم و دنیا با همه بزرگیش مثل تو را
ندارد.....

و تو ای مادر، ای شوق زیبای نفس کشیدن، ای روح مهربان، مستی ام

تو رنگ شادی هایم شدی و غم ها را با تمام وجود از من دور کردی و

عمری خشکی را با به جان خریدی تا اکنون توانستی طعم خوش

پیروزی را به من بچشانی.

و تقدیم به برادرانم:

که همواره در طول تحصیل متحمل زحمت بوده اند و تکیه گاه من در مواجهه با مشکلات، و وجودشان مایه دلگرمی من می باشد.

تقدیم به خواهرم:

که وجودش شادی بخش و صفایش مایه آرامش من است.

تقدیر و شکر

ای، هستی بخش وجود ما بر نعمات بی کرانت شکر نیست. ذره ذره وجودمان برای تومی تپد. الهی مراد دکن تا دانش اندکم، نه نزد بانی باشد برای فزونی، تکبر و غرور، و نه حلقه ای برای اسارت، و نه دست یابنده ای برای تجارب، بلکه گامی باشد برای تجلیل از تو و متعالی ساختن زندگی خود و دیگران.

حال که توفیق جمع آوری و تهیه این پروژه را یافته ام بر خود واجب می دانم از تمامی عزیزانی که در طی این پژوهش از راهبانی و یاریشان بهره مند گشته ام شکر و قدردانی کنم.

از استاد ارجمند اسوه ی علم و اخلاق جناب آقای دکتر حسن زاده که با سه صدر و صبوری مرارتهایی نمودند، صمیمانه شکر و قدردانی می نمایم.

با تقدیر و درود فراوان خدمت پدر و مادر بسیار عزیز، دلوز و فداکارم که پیوسته جرعه نوش جام تعلیم و تربیت، فضیلت و انسانیت آنها بوده ام و همواره چراغ وجودشان روشنگر راه من در سختی ها و مشکلات بوده است. و با شکر خالصانه خدمت همه کسانی که به نوعی مراد به انجام رساندن این مهم یاری نموده اند.

چکیده

نور حامل تکانه است و هرگونه تغییر در جهت آن به وسیله سایر اجسام باعث ایجاد نیروی اپتیکی بر آنها خواهد شد. نیروی اپتیکی میدان میرا، برای به دام انداختن پروتئین‌ها و مولکول‌های واحد مفید است، و کاربردهای بالقوه‌ای در دستکاری ذرات مسطح گونه نزدیک سطوح دی الکتریک دارد. نیروی اپتیکی میدان میرای ناشی از بازتابش داخلی کلی پرتوی گاوسی در سطح مشترک منشور و فیلم بر روی کره‌های دی الکتریک توسط گروه‌های دیگر اثبات شده است. به جای منشور می‌توان از یک موجبر برای تولید میدان میرا استفاده کرد. وقتی یک باریکه نور وارد موجبر می‌شود میدان میرایی در سطح موجبر ایجاد می‌شود.

ما در این رساله به طور نظری، محاسبات فشار اپتیکی میدان میرای موجبر بر روی یک فیلم نازک دی الکتریک غوطه‌ور در مایع را انجام می‌دهیم. روش کار به این صورت است که ابتدا یک موجبر چند مده را طراحی می‌کنیم سپس میدان‌های الکترومغناطیسی در لایه‌های بالا و پایین نمونه را از تئوری محیط‌های چندلایه‌ای محاسبه می‌کنیم، و فشار اپتیکی میدان میرا بر روی نمونه را با استفاده از تانسور تنش ماکسول محاسبه می‌کنیم. با محاسبه‌ی فشار اپتیکی، اثرات فاصله‌ی فیلم نازک تا موجبر، ضریب شکست و ضخامت فیلم نازک و قطبش نور فرودی بر روی فشار اپتیکی را بررسی می‌کنیم. در نهایت، محاسبات قبلی را برای ساختار تشدیدی تکرار می‌کنیم. مشاهده می‌کنیم که مقدار فشار اپتیکی وارد بر یک نمونه در ساختاری تشدیدی، در مقایسه با ساختار نمونه موجبر عادی دو مرتبه افزایش خواهد یافت.

کلمات کلیدی: نیروی اپتیکی میدان میرا، فشار اپتیکی، موجبر چند مده، تانسور تنش ماکسول.

فهرست مطالب

۹	۱ ساختار موجبر
۹	۱.۱ مقدمه
۹	۲.۱ موجبرها
۱۱	۳.۱ اساس کار موجبرها
۱۱	۱.۳.۱ بازتابش داخلی کلی
۱۳	۲.۳.۱ شرایط انتشار نور داخل موجبر
۱۴	۴.۱ حل معادله‌ی موج ماکسول
۱۴	۱.۴.۱ معادلات ماکسول
۱۶	۲.۴.۱ معادلات امواج الکترومغناطیسی
۱۷	۳.۴.۱ شرایط مرزی
۱۷	۴.۴.۱ قطبش امواج الکترومغناطیسی
۱۸	۵.۴.۱ حل معادلات ماکسول برای موجبر
۲۲	۶.۴.۱ معادله‌ی پراکندگی
۲۴	۵.۱ پارامترهای تعمیم یافته
۲۵	۱.۵.۱ پارامترهای a, b, c و v (برای موجبر معمولی و متقارن)
۲۶	۲.۵.۱ نمودار bv
۲۶	۳.۵.۱ بسامد و ضخامت قطع
۲۷	۴.۵.۱ ضخامت مؤثر موجبر
۲۸	۵.۵.۱ پارامترهای تعمیم یافته برای موجبر معکوس
۳۰	۲ فشار میدان میرای موجبر روی یک فیلم نازک دی الکتریک
۳۰	۱.۲ مقدمه
۳۱	۲.۲ میدان میرا
۳۳	۳.۲ محیط‌های چند لایه
۳۳	۴.۲ رابطه‌ی بین میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی
۳۵	۵.۲ ضرایب فرنل

۳۵	۱.۵.۲	ضرایب فرنل برای قطبش p نور
۳۶	۲.۵.۲	ضرایب فرنل برای قطبش s نور
۳۸	۶.۲	ماتریس مشخصه
۴۰	۱.۶.۲	ماتریس مشخصه‌ی گروهی از فیلم‌های نازک
۴۱	۷.۲	انتقال از یک گروه فیلم‌های نازک
۴۲	۸.۲	فشار میدان میرای ناشی از موجبر بر فیلم نازک دی الکتریک
۴۳	۱.۸.۲	میدان‌های الکترومغناطیسی سیستم چند لایه (قطبش p)
۴۶	۲.۸.۲	معادله مد محیط چند لایه (موجبر ۵ لایه)
۴۸	۳.۸.۲	میدانهای الکترومغناطیسی در سیستم چند لایه (قطبش s)
۴۹	۴.۸.۲	فشار اپتیکی وارد بر فیلم دی الکتریک
۵۲	۵.۸.۲	نیروی اپتیکی
۵۳	۶.۸.۲	فشار اپتیکی مد TM
۵۴	۷.۸.۲	فشار اپتیکی مد TE
۵۵	۹.۲	فشار میدان میرای موجبر وارد بر یک نمونه زیستی
۵۶	۱۰.۲	افزایش فشار اپتیکی با تقویت میدان میرا به وسیله‌ی موجبر
۶۰	۳ نتایج و بحث	
۶۰	۱.۳	نمودار bv برای موجبر معمولی
۶۲	۲.۳	نمودار فشار اپتیکی بر حسب تعداد مدهای موجبر (D_2 متغیر)
۶۲	۳.۳	نمودار فشار اپتیکی بر حسب تعداد مد برای ضخامت‌های مختلف نمونه
۶۳	۴.۳	نمودار فشار اپتیکی بر حسب تعداد مد برای نمونه های مختلف
۶۴	۵.۳	نمودار فشار اپتیکی بر حسب تعداد مدهای موجبر برای قطبش‌های s و p
۶۵	۶.۳	نمودار انعکاس و انتقال در مرزهای پائین و بالای نمونه
۶۵	۷.۳	نمودارهای فشار اپتیکی برای نمونه‌ی زیستی
۶۸	۸.۳	نمودارهای فشار اپتیکی میدان میرای منشور، تقویت شده با موجبر
۷۵	الف استفاده از نرم افزار Matlab برای رسم نمودارها	
۷۵	۱.الف	نمودار فشار اپتیکی ساختار شامل موجبر
۷۷	۲.الف	نمودار فشار اپتیکی ساختار تشدیدی

لیست جداول

۶۱	پارامترهای موجبر معمولی برای دو قطبش s,p مربوط به نمودار ۱.۳	۱.۳
۷۲	مقادیر بیشینه و کمینه فشار اپتیکی برای موجبرهای ۱، ۵، ۹ و ۱۳ مدی	۲.۳

لیست تصاویر

۱	اساس کار انبرک نوری.	۲
۲	انواع نیروهای اپتیکی: نیروی گرادیان، پراکندگی و نیروی خالص	۳
۳	دوموجبریکسان با سطح مقطع $b \cdot h$ در فاصله نانومتری a از هم	۴
۴	تولید میدان میرا در یک بازتابش داخلی کلی	۴
۵	مقایسه دو ساختار: الف) شامل لایه دی الکتریک (ب) شامل لایه فلزی [۳۴].	۵
۱.۱	انواع مختلف ساختارهای موجبری	۱۰
۲.۱	ساختمان یک موجبر تخت.	۱۱
۳.۱	انواع موجبرها: الف) موجبر ضریب متغیر (ب) موجبر ضریب پله ای	۱۱
۴.۱	پدیده بازتابش داخلی کلی	۱۲
۵.۱	انواع موجبر: الف) موجبر معمولی (ب) موجبر متقارن (ج) موجبر معکوس	۱۲
۶.۱	باریکه‌ی نور با زاویه‌ی تابش θ_m در موجبر در حال انتشار است	۱۳
۷.۱	مولفه‌های بردار موج در راستای x, z	۱۴
۸.۱	موج الکترومغناطیسی عرضی الف) قطبش TM (ب) قطبش TE	۱۸
۹.۱	موجبر تخت سه لایه با ضریب شکست n_0, n_1, n_2 و ضخامت فیلم h	۱۹
۱۰.۱	انواع مد الف) مد هدایتی (ب) مد زیر لایه (ج) مد تابشی، در موجبر تخت	۲۱
۱۱.۱	ضخامت موثر فیلم موجبر مسطح	۲۸
۱.۲	تابش مایل امواج الکترومغناطیسی به مرز مشترک دو محیط (قطبش s)	۳۱
۲.۲	میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی برای الف) قطبش p (ب) قطبش s	۳۸
۳.۲	موج تخت تابیده بر یک فیلم نازک	۳۹
۴.۲	نماد گذاری برای دو فیلم در سطح زیر لایه	۴۲
۵.۲	ساختار ۵ لایه برای مطالعه فشار میدان میرای موجبر بر فیلم نازک	۴۳
۶.۲	میدان‌های الکترومغناطیسی سیستم چند لایه برای قطبش نور فرودی s	۴۸
۷.۲	ساختار ۷ لایه برای مطالعه فشار اپتیکی وارد بر نمونه زیستی (سلول)	۵۵
۸.۲	ساختار چند لایه مورد مطالعه برای تحلیل فشار اپتیکی وارد بر نمونه	۵۶

۶۱	نمودار bv موجبر معمولی	۱.۳
۶۲	نمودار فشار اپتیکی بر حسب تعداد مد برای موجبر معمولی (D_2 متغیر)	۲.۳
۶۳	نمودار فشار اپتیکی بر حسب تعداد مد برای موجبر معمولی (متغیر D_3)	۳.۳
۶۴	نمودار فشار اپتیکی بر حسب تعداد مد برای موجبر معمولی (متغیر n_3)	۴.۳
۶۴	نمودار فشار اپتیکی بر حسب تعداد مد برای موجبر معمولی با قطبش s و p	۵.۳
۶۵	نمودار $ t_2 ^2 + r_2 ^2$ و $ t_4 ^2$ بر حسب مرتبه‌ی مد برای موجبر معمولی	۶.۳
۶۶	نمودار فشار اپتیکی بر حسب تعداد مد برای نمونه زیستی (قطبش s, p)	۷.۳
۶۶	نمودار فشار اپتیکی بر حسب تعداد مد برای تاثیر غشاء سلولی	۸.۳
۶۷	نمودار فشار اپتیکی بر حسب تعداد مد برای نمونه زیستی (متغیر A)	۹.۳
۶۸	نمودار $ t_2 ^2 + r_2 ^2$ و $ t_6 ^2$ بر حسب تعداد مد برای نمونه زیستی	۱۰.۳
۶۹	نمودار فشار اپتیکی بر حسب زاویه تابشی به منشور (فشار دارای یک قله)	۱۱.۳
۶۹	نمودار فشار اپتیکی بر حسب زاویه تابشی به منشور (فشار دارای دو قله)	۱۲.۳
۷۰	نمودار فشار اپتیکی بر حسب زاویه تابشی به منشور (فشار دارای سه قله)	۱۳.۳
۷۱	نمودار فشار اپتیکی بر حسب زاویه تابشی به منشور (فشار دارای چهار قله)	۱۴.۳
۷۱	فشار اپتیکی بر حسب زاویه تابشی به منشور (تعداد قله‌های مختلف)	۱۵.۳
۷۲	نمودار فشار اپتیکی بر حسب زاویه تابشی به منشور (n_5 متغیر)	۱۶.۳
۷۳	نمودار فشار اپتیکی بر حسب زاویه تابشی به منشور (قطبش متغیر)	۱۷.۳
۷۳	نمودار $(t_4 ^2 + r_4 ^2)$ و $ t_6 ^2$ بر حسب زاویه فرودی برای موجبر هفت مدی	۱۸.۳
۷۴	فشار اپتیکی بر حسب زاویه فرودی (فاصله نمونه تا فیلم موجبری متغیر).	۱۹.۳
۷۴	فشار اپتیکی بر حسب زاویه فرودی (ضخامت نمونه دی‌الکتریک متغیر)	۲۰.۳

مقدمه

محققان توجه زیادی به تبدیل انرژی الکترومغناطیسی به حرکت مکانیکی دارند. در اوایل قرن هفدهم کپلر^۱ ستاره شناس آلمانی پیشنهاد کرد که تابش خورشید مسئول انحراف دنباله‌ی ستاره‌ی دنباله‌دار دور خورشید است. در سال ۱۸۹۳ جیمز کلارک ماکسول^۲ به طور نظری نشان داد که نور خودش یک نیروی اپتیکی یا فشار تابشی^۳ اعمال می‌کند اما این نظریه به طور تجربی تا پایان قرن اثبات نشد. در سال ۱۹۰۳ لبدیو^۴، نیکولز و هول^۵ [۱، ۲] بر اساس فرضیات ماکسول ثابت کردند که نور می‌تواند بر روی یک صفحه‌ی فلزی در خلاء حرکت قابل اندازه‌گیری را القا کند. برتری پرتوهای نور لیزری از نظر همدوسی و شدت بالا، در سال ۱۹۶۰ در نهایت محققان را برای مطالعه‌ی فشار تابشی، از طریق استفاده از شدت، منابع نور تنظیم شده توانا ساخت. تصور اینکه بتوان سلولی را بدون تماس فیزیکی با آن حرکت داد، خیال پردازی به نظر می‌رسد. اما، حقیقت این است که می‌توان با استفاده از خواص ویژه‌ی پرتوی نوری لیزر این کار را انجام داد. این قابلیت در زمینه‌های متفاوتی اعم از موتورهای مولکولی، میکروسیالات، میکرومکانیک و ... مورد توجه قرار گرفته است [۳]. به دام انداختن^۶ و دستکاری اپتیکی^۷ به طور گسترده‌ای در علوم مختلف به خصوص در فیزیک، شیمی و زیست‌شناسی برای تماس غیرمکانیکی استفاده شده است [۸، ۱۰، ۵]. آرتور اشکین^۸ در سال ۱۹۷۰ جزو پیشگامانی بود که نیروی فشار تابشی پرتولیزر را برای دستکاری کردن، به دام انداختن، و شتاب دادن ذرات مای، پیشنهاد و آزمایش کرد [۴]. به ویژه با اثبات روشی که در سال ۱۹۸۶ برای به دام انداختن ذرات توسط پرتو منفرد (که انبرک نوری^۹ نامیده می‌شود) استفاده شد، شروع شد [۵]. انبرک نوری از ابزارهای علمی است. در این ابزار از پرتو لیزر با قابلیت تمرکز بالا برای ایجاد نیروی جاذبه یا دافعه استفاده می‌شود. شکل ۱ اساس کار انبرک نوری را نمایش می‌دهد، اساس کار این است که پرتوهای لیزر را در یک نقطه متمرکز می‌کنند و پرتوها بر اثر برخورد با ذره بازتاب می‌کنند. بنا به اصل پایستگی اندازه حرکت، به میزانی که اندازه حرکت نور تغییر

^۱Kepler

^۲James Clerk Maxwell

^۳Radiation Pressure

^۴Lebdew

^۵Nichols and Hull

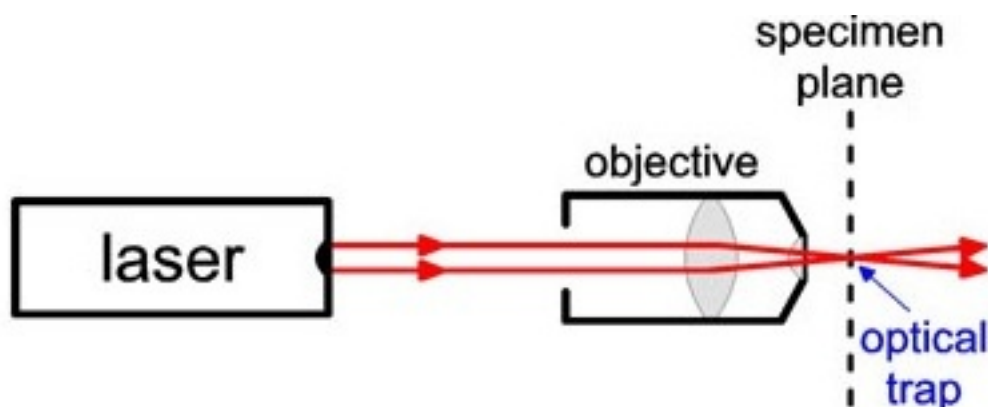
^۶Trapping

^۷Manipulation

^۸Arthur Ashkin

^۹Optical Tweezer

کرده (برداری) به همان اندازه و در خلاف جهت، اندازه حرکت ذره تغییر می کند.



شکل ۱: اساس کار انبرک نوری.

انبرک نوری کاربردهای زیادی از جمله، به دام انداختن و دستکاری کردن ذرات کوچک مانند اتمها [۶]، مولکولها [۷]، ذرات دی الکتریک در اندازه‌ی کوچک [۸، ۹]، سلول‌های زیستی زنده [۱۰-۱۲] و ذرات فلزی [۱۳، ۱۴] دارد.

چون نور حامل تکانه است، بنابراین، تغییر جهت نور به این معنا است که حتماً نیرویی در رابطه با این تغییر وجود دارد. نیروی تابشی با تبادل اندازه حرکت (تکانه) و انرژی بین فوتون‌ها و ذرات تولید می‌شود.

به طور کلی میدان‌های اپتیکی می‌توانند نیروهایی را بین اجسام ذره بینی^۱ القا کنند که به این نیروها، نیروهای اپتیکی (یا تابشی) گویند. این دیدگاه می‌تواند برای دسته بندی ذرات به دام انداخته شده به دو گروه مفید باشد که عبارتند از:

۱- اجسام با شعاع بزرگتر از $\frac{\lambda_0}{4}$ (طول موج پرتو لیزر در خلاء است) که در این مورد برای توصیف نیروی بین جسم و پرتو لیزر از نظریه‌ی کلی پراکندگی لورنتز-مای^۲ استفاده می‌شود [۱۵].

۲- اجسام با شعاع کوچکتر از $\frac{\lambda_0}{4}$ که می‌تواند به صورت دو قطبی الکتریکی در نظر گرفته شوند و نظریه‌ی پراکندگی ریلی^۳ ابزار نظری مناسبی برای توصیف این برهم کنش است [۱۶].

نیروهای اپتیکی بر موجودات زنده بزرگتر اثر نامحسوسی دارند و کوتاه برد هستند، اما آنها می‌توانند در مقیاس درشت مولکولها و حتی همه‌ی سلولها اثر قابل ملاحظه‌ای داشته باشند. یک نیروی ۱۰ پیکونیوتونی (برابر با یک میکرو دین) می‌تواند یک باکتری گیاهی^۴ را به درون آب حرکت دهد و یک سلول نطفه‌ی شناگر^۵ را در مسیر خودش متوقف کند و یا از حرکت کیسه کوچک درون یاخته‌ای^۶ (درون سلول) ممانعت کند.

همچنین، یک نیرو در این اندازه می‌تواند تک مولکولهای درشت مانند DNA و RNA را جذب و یا خم

^۱Microscopic

^۲Lorentz-Mie Scattering theory

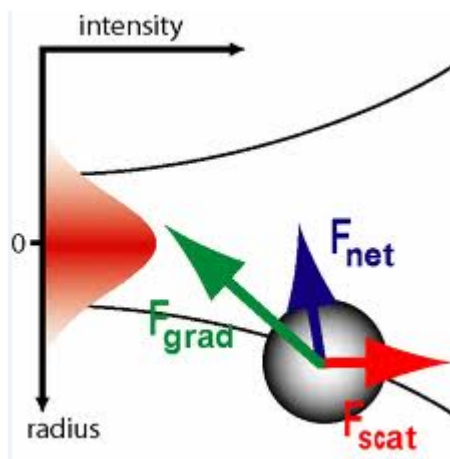
^۳Rayleigh Scattering theory

^۴Bactrium

^۵Sprem cell

^۶Intracellular Vesicle

کند [۱۷]. مهمترین نیروهای اپتیکی، نیروی گرادیان^۷ و نیروی پراکندگی (یا فشار تابشی)^۸ است. نیروی



شکل ۲: انواع نیروهای اپتیکی: نیروی گرادیان، پراکندگی و نیروی خالص

گرادیان متناسب با مجذور گرادیان میدان الکتریکی و عامل جذب ذرات به سمت مرکز شدت نور است با این وجود نیروی پراکندگی متناسب با بردار پوینینگ^۹ است و ناشی از انتقال اندازه حرکت ایجاد شده به وسیله پراکندگی فوتون‌ها از ذرات است.

در این رساله ما از نیروی پراکندگی (یا فشار تابشی) استفاده می‌کنیم.

فشار تابشی ناشی از یک پرتو لیزر متمرکز شده قادر است ذرات کوچک را به دام بیناندازد. در علوم زیستی این ساختار می‌تواند برای اعمال نیروهایی در محدوده پیکونیوتون و اندازه‌ی جابجایی در محدوده‌ی نانومتر، برای اجسامی که اندازه‌ی آنها در محدوده ۱۰ نانومتر تا بیش از ۱۰۰ نانومتر است استفاده شود [۱۷]. همچنین فشار تابشی می‌تواند از پرتو لیزر تابیده شده به درون دو موجبر دی الکتریک که در فاصله‌ی نانومتری از هم قرار دارند، تولید شود (شکل ۳). منشأ فیزیکی این فشار بر هم کنش دو قطبی‌های الکتریکی دی الکتریک با امواج الکترومغناطیسی تابیده شده است و نوع این فشار بسته به تقارن و هندسه‌ی موجبرها می‌تواند باعث دافعه یا جاذبه شود و موجب می‌شود که دو موجبر از هم دور و یا به هم نزدیک شوند [۱۸].

همچنین امواج میرای تولید شده در نزدیک صفحه‌ی زیر لایه‌ی (دی الکتریک یا فلز) که نور لیزر به آنها تابیده شده است، می‌تواند نیروی اپتیکی قوی بر روی ذرات کوچک اعمال کند [۲۴-۱۹]. موج میرای یک میدان نزدیک است که شدت آن با فاصله از مرز (جایی که موج شکل گرفته است)، به طور نمایی کاهش می‌یابد، وقتی یک موج به مرز بین دو محیط با خواص مختلف برخورد کند، اگر دستخوش بازتابش داخلی کلی شود، موج میرا شکل می‌گیرد (شکل ۴).

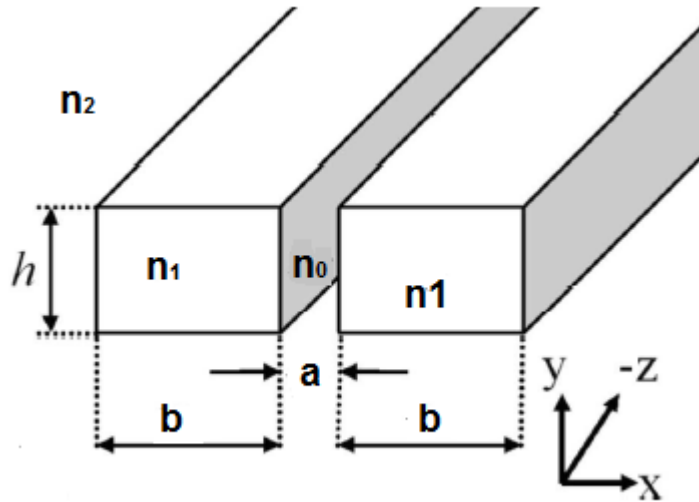
امواج میرا با شدت بالا برای کاربردهایی در اپتیک غیر خطی مفید شناخته شده است [۲۵]. زمینه‌ی دیگر استفاده از چنین امواجی آینه‌های اتمی است [۲۶، ۲۷].

از میدان میرا به عنوان یک منبع روشنایی برای تحریک مولکول‌های فلورسنت موجود در یک مایع نزدیک

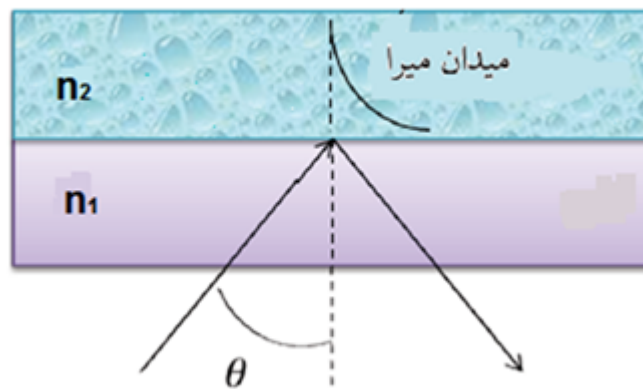
^۷Gradient Force

^۸Scattering (or Radiation Pressure) Force

^۹Poynting vector



شکل ۳: دو موجبر یکسان با سطح مقطع $b \times h$ در فاصله نانومتری a از هم



شکل ۴: تولید میدان میرا در یک بازتابش داخلی کلی

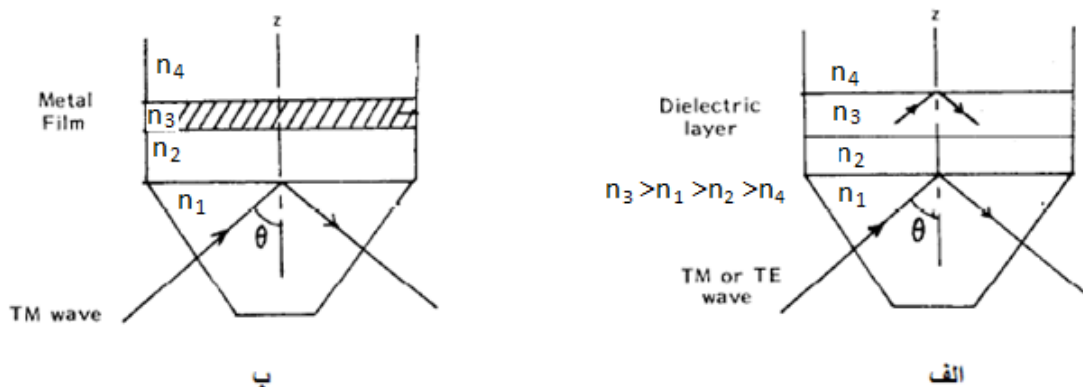
سطح مشترک و همچنین مولکولهای فلورسنت روی سطح سلول استفاده می‌شود [۲۸]. ما میدان میرا را به عنوان منبع تولید فشار تابشی در نظر می‌گیریم و کاربردهای آن را در این زمینه بیان می‌کنیم. کاواتا و ساگیورد در سال ۱۹۹۳ نتایج عددی فشار تابشی اعمالی بر فیلم نازک را در میدان میرای ناشی از موج الکترومغناطیسی فرودی تخت، تحت بازتابش داخلی کلی نشان دادند [۲۱]. همچنین آنها در سال ۱۹۹۹ به طور تجربی حرکت ذرات در اندازه‌های خیلی کوچک را در میدان میرای تولید شده نزدیک سطح زیر لایه‌ی دی الکتریک که نور در آن دستخوش بازتابش داخلی کلی شده بود را مشاهده و گزارش کردند [۲۲]. مطالعات زیادی بر روی میدان میرای تولید شده به وسیله‌ی بازتابش داخلی کلی ناشی از پرتوهای گاوسی نیز، از جمله محاسبات نظری نیروی اپتیکی وارد بر کره‌ی دی الکتریک [۲۳]، فشار تابشی وارد شده بر فیلم دی الکتریک در یک محیط چند لایه [۲۴]، چرخش القایی اپتیکی ذرات مای ترکیب شده [۳۰] انجام شده است.

فشار میدان میرای تولید شده از موج فرودی تخت، بر روی ساختار چند لایه شامل منشور و دی الکتریک را می‌توان با استفاده از جفت‌شدگی با پلاسمون‌های سطحی^۱ افزایش داد که در آن فشار میدان میرا بر روی فیلم دی الکتریک نامتناهی قرار گرفته در مرز مشترک فلز-دی الکتریک در حدود چند مرتبه از نظر اندازه، در مرزهای فلزی مربوط به پلاسمون‌های سطحی افزایش یافته است (پلاسمون سطحی، نوسانات جمعی چگالی الکترون‌های آزاد سطحی از فلز در تماس با دی الکتریک است) [۳۱].

با استفاده از این ساختار تشدیدی^۱ در میدان میرای ساختار تشکیل شده از فیلم‌های چند لایه (شامل یک فیلم فلزی)، به طور نظری نیروی وارد بر ذرات مای محاسبه شده است [۳۲].

راه دیگر افزایش فشار اپتیکی، افزایش میدان با استفاده از یک ساختار چند لایه (شامل منشور و موجبر) که در آن دو لایه‌ی دی الکتریک بر روی منشور قرار گرفته است. لایه‌ی اول چسپیده به منشور با ضریب شکست کمتر از منشور و لایه‌ی دوم با ضریب شکست بالاتر از منشور (ضریب شکست لایه دوم بیشتر از لایه اول و منشور است) که بر روی آن یک لایه‌ی هوا قرار دارد (که با هم تشکیل یک موجبر می‌دهند) [۳۳].

برای مقایسه‌ی افزایش میدان میرا از دو ساختار تشدیدی استفاده می‌کنیم که دارای ساختار یکسانی هستند با این تفاوت که در یکی از ساختارها، یک لایه‌ی فلز و در دیگری به جای فلز یک لایه‌ی دی الکتریک قرار گرفته است، و اثبات شده است که شدت میدان میرا در ساختار دی الکتریک در حدود شش برابر بیشتر از ساختار شامل فلز است [۳۴]. فشار اپتیکی وارد بر یک فیلم دی الکتریک برای ساختار تشدیدی شامل یک لایه‌ی نازک فلزی



شکل ۵: مقایسه دو ساختار (الف) شامل لایه‌ی دی الکتریک (ب) شامل لایه فلزی [۳۴].

بررسی و اثبات شده است (شکل ۵ ب) [۳۱]. محاسبات مربوط به فشار میدان میرای تولید شده به وسیله‌ی بازتابش داخلی کلی منشور بر روی فیلم‌های دی الکتریک انجام شده است، اما برای ساختار تشدیدی شامل دی الکتریک انجام نشده است (شکل ۵ الف). همچنین استفاده از ساختار شامل موجبر به جای منشور، برای تولید میدان میرا استفاده نشده است.

همانطور که در فصل اول نیز اشاره خواهد شد، موجبرها ساختارهای اپتیکی هستند که برای محدود کردن و هدایت امواج الکترومغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گیرند و بر اساس شکل فیزیکی آنها به گونه‌های مختلفی

^۱ Surface Plasmons

^۱ Resonance

تقسیم می‌شود [۳۵]. در این رساله از موجبر تخت استفاده می‌کنیم که از سه لایه‌ی، زیر لایه^۲ با ضریب شکست n_0 ، فیلم موجبری با ضریب شکست n_1 ^۳ و لایه‌ی رویی (محیط پوشش)^۴ با ضریب شکست n_2 تشکیل شده است. برای اینکه نور در موجبر به انتشار در آید یک سری شرایط باید مهیا باشد که اساسی‌ترین آن این است که ضریب شکست فیلم موجبری بزرگتر از دو لایه‌ی دیگر باشد، بنابراین در زوایای تابشی خاصی، باریکه‌ی نور درون فیلم موجبری دچار بازتابش‌های داخلی کلی متوالی از مرز مشترک لایه‌های فیلم-زیر لایه و فیلم-پوشش شده و در یک مسیر زیگزاگ در راستای فیلم انتشار می‌یابد. در نتیجه این پدیده، یک میدان میرا کوتاه برد (در حدود ۱۰۰ نانومتر) در لایه‌های زیر لایه و پوشش تولید خواهد شد. شدت میدان میرا در سطح موجبر به قطبش نور فرودی، زاویه‌ی تابشی، طول موج و ضرایب شکست لایه‌های موجبر بستگی دارد [۳۶].

بنابراین، با قرار دادن یک فیلم دی‌الکتریک غوطه‌ور در یک سیال، در میدان میرای تولید شده توسط موجبر می‌توانیم بطور نظری فشار اپتیکی وارد بر آن را محاسبه کنیم.

روشی که در فصل دوم برای محاسبه‌ی فشار اپتیکی ارائه می‌دهیم استفاده از تانسور تنش ماکسول^۱ است که از پایستگی تکانه‌ی خطی نتیجه می‌شود [۳۷].

تانسور تنش ماکسول یک ابزار ریاضی در فیزیک است و یک تانسور مرتبه‌ی دو است و در الکترومغناطیس کلاسیک برای نمایش برهم‌کنش بین نیروهای الکتریکی/مغناطیسی و تکانه‌ی خطی استفاده می‌شود در یک حالت ساده مانند حرکت یک بار نقطه‌ای در یک میدان مغناطیسی همگن از قانون نیروی لورنتس استفاده می‌کنیم. اما برای یک حالت پیچیده، محاسبه‌ی نیرو مشکل است و به معادلات چندگانه می‌رسیم. بنابراین، می‌توانیم با جمع بسیاری از این جملات در تانسور تنش ماکسول و با محاسبه‌ی تانسور مورد استفاده جواب مسأله را پیدا کنیم.

همانطور که در فصل دوم اشاره خواهیم کرد، تانسور تنش ماکسول به عنوان ترکیبی از میدان‌های الکترومغناطیسی معرفی خواهد شد. بنابراین، باید میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در مرزهای نمونه‌ی دی‌الکتریک را به دست آوریم. ساختار مورد مطالعه ما برای تحلیل فشار اپتیکی وارد بر یک فیلم نازک دی‌الکتریک شامل یک موجبر تخت سه لایه و یک نمونه غوطه‌ور در مایع است. فشار را در دو حالت بررسی می‌کنیم، وقتی که فیلم نمونه تنها یک لایه و وقتی که شامل سه لایه است. هدف ما در انتخاب چنین نمونه‌هایی این است که آنها را به حالت واقعی سلول‌های زنده تعمیم دهیم. نمونه‌ی زیستی (سلول) شامل سیتوپلاسم (با ضخامت در حدود ۱۰۰ نانومتر) است که در اطراف آن لایه‌ای به نام غشا سلولی (ضخامت آن در حدود ۸ نانومتر) قرار گرفته است و در آب غوطه‌ور است. ابتدا فشار تابشی میدان میرای موجبر بر روی یک لایه فیلم دی‌الکتریک تخت (با چشم پوشی از غشاسلولی) را بررسی می‌کنیم. سپس، سه لایه دی‌الکتریک (بدون چشم پوشی از غشاسلولی) را به عنوان نمونه در نظر می‌گیریم. نمونه زیستی در حالت کلی تخت نیست، اما اگر به سطح بچسبد فواصل آن از صفر تا ۱۰۰ نانومتر است، در این صورت تبدیل به یک صفحه بزرگ می‌شود، یعنی بعد از مدت زمانی که سلول در نزدیکی سطح قرار می‌گیرد به سطح می‌چسبد و ما می‌توانیم آن را یک صفحه در نظر بگیریم یعنی به جای یک ساختار سه بعدی فقط یک صفحه

^۲Substrate

^۳Waveguiding Film

^۴Cover Medium

^۱Maxwell stress tensor

در نظر می‌گیریم.

ساختار موجبر و فیلم نازک دی الکتریک غوطه‌ور در مایع، در مجاورت سطح پوشش آن تشکیل یک ساختار پنج لایه می‌دهند. ساختارهای چند لایه شامل مجموعه‌ای از محیط‌ها با ضرایب شکست و خواص اپتیکی متفاوت در هر محیط نسبت به سایر محیط‌هاست. بنابراین، برای محاسبه‌ی میدان‌های الکترومغناطیسی مرزهای نمونه از تئوری فیلم‌های چند لایه استفاده می‌کنیم [۳۸]. در این تئوری با داشتن میدان‌های الکترومغناطیسی در هر محیط، می‌توانیم میدان‌های الکترومغناطیسی را در تمامی محیط‌های دیگر با استفاده از ماتریس مشخصه (که در فصل دوم آن را معرفی می‌کنیم) به دست آوریم. با محاسبه‌ی فشار اپتیکی وارد بر نمونه شامل یک فیلم تک لایه، آن را به یک نمونه شامل سه لایه فیلم (دولایه به عنوان غشاء^۱ و یک لایه به عنوان سیتوپلاسم^۲ که با هم تشکیل یک نمونه زیستی می‌دهند). تعمیم می‌دهیم. در فصل سوم اثرات ضخامت و ضریب شکست نمونه، فاصله‌ی نمونه تا فیلم موجبری و قطبش نور فرودی را بررسی می‌کنیم و نمودارهای مربوط به آن را ترسیم می‌کنیم. مشاهده خواهیم کرد که فشار اپتیکی برای ساختار شامل موجبر معمولی برای تمام مد‌ها دافعه است. تغییرات ضخامت فیلم نمونه برای ضخامت‌های کوچکتر از 0.5λ اثرات قابل ملاحظه‌ای روی فشار دارد، اما برای ضخامت‌های بزرگتر از 0.5λ مقدار فشار تغییر محسوسی با تغییر ضخامت نمونه نخواهد کرد. همچنین ضخامت فیلم نمونه بر روی نوع فشار (جاذبه یا دافعه) اثری ندارد.

ضریب شکست نمونه عامل دیگری است که اثر آن را بر روی فشار اپتیکی بررسی می‌کنیم و مشاهده می‌کنیم که ضریب شکست نمونه هم بر روی مقدار عددی فشار و هم بر روی نوع فشار (دافعه یا جاذبه بودن) بستگی دارد و هر چه ضریب شکست نمونه به ضریب شکست فیلم موجبری نزدیکتر باشد مقدار فشار بیشتر می‌شود. در بررسی تأثیر فاصله‌ی نمونه تا فیلم موجبری نتیجه می‌گیریم که فشار اپتیکی با فاصله‌ی نمونه از سطح فیلم موجبر رابطه‌ی عکس دارد و با افزایش فاصله مقدار فشار کاهش می‌یابد زیرا با افزایش فاصله شدت میدان میرا کاهش می‌یابد.

همچنین قطبش نور فرودی نیز برای مد‌های پائین تأثیر محسوسی ندارد اما با افزایش مرتبه‌ی مد موجبر مشاهده می‌کنیم که قطبش نور فرودی بر روی مقدار فشار (برای قطبش s بیشتر از قطبش p می‌شود) و نوع آن تأثیر دارد.

همان طور که اشاره کردیم مطالعه بر روی افزایش فشار برای ساختار شامل دو لایه دی الکتریک (که تشکیل موجبری می‌دهند) انجام نشده است. ما در انتهای فصل دوم فشار میدان میرای تولید شده از بازتابش داخلی کلی منشور که به وسیله‌ی یک موجبر معمولی چند مد تقویت شده است را بر روی یک لایه‌ی نازک فیلم محاسبه می‌کنیم و در فصل سوم اثرات تعداد مد و قطبش نور فرودی را بر روی آن بررسی می‌کنیم و نمودارهای مربوط به آن را ترسیم می‌کنیم. می‌بینیم که برای موجبر یک تا چهار مد یک قله‌ی (بیشینه) فشار ظاهر می‌شود و با افزایش تعداد مد‌های موجبر قله‌های فشار افزایش می‌یابد. ما این کار را تا موجبرهای ۱۶ مد ادامه می‌دهیم و مشاهده می‌کنیم که با افزایش تعداد مد‌های موجبر، علاوه بر تعداد قله‌های فشار، نوع فشار نیز می‌تواند تغییر کند به طوری که از موجبر ۱ تا ۱۲ مد نوع فشار همواره دافعه و از موجبر ۱۳ مد به بعد نوع فشار می‌تواند دافعه یا جاذبه باشد.

^۱ Cell Membrane

^۲ Cytoplasm

لازم به ذکر است که فشار اپتیکی وارد بر نمونه در این حالت بیشتر از ساختار تشدیدی استفاده شده از فلز [۳۱] ، است.

فصل ۱

ساختار موجبر

۱.۱ مقدمه

موجبرها ساختارهای مهمی هستند که کاربردهای فراوانی دارند، در این رساله ما می‌خواهیم از آنها به عنوان منشا اصلی تولید کننده‌ی فشار اپتیکی استفاده کنیم، بنابراین لازم است که با ساختار و اساس کار آنها آشنا شویم، به همین دلیل در ابتدای این فصل موجبرها را تعریف می‌کنیم و ساختمان آنها را توضیح می‌دهیم. انواع موجبرها را معرفی کرده و تفاوت آنها را با هم بیان می‌کنیم، در ادامه با بیان معادلات ماکسول، این معادلات را در نواحی سه‌گانه موجبر حل می‌کنیم و میدان‌های الکترومغناطیسی را در آنها به دست می‌آوریم و با بیان شرایط مرزی و اعمال آنها روی میدان‌های الکترومغناطیسی به معادله‌ی مهمی به نام معادله‌ی پراکندگی می‌رسیم. در نهایت با استفاده از پارامترهای تعمیم یافته، موجبرهای موردنظر را طراحی می‌کنیم.

۲.۱ موجبرها

موجبرها ساختار اپتیکی هستند که برای محدود کردن امواج الکترومغناطیسی و انتشار آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. اولین ساختار هدایت امواج در سال ۱۹۸۳ توسط تامسون^۱ پیشنهاد شد، لرد رایلی^۲ در سال ۱۸۹۷ ریاضیات حاکم بر امواج الکترومغناطیسی هدایت شده در یک موجبر استوانه‌ای را محاسبه نمود [۳۹]. سامر فیلد^۳ و دبی^۴ نیز در اوائل سال ۱۹۲۰ موجبر دی‌الکتریک را معرفی کردند [۴۰]. موجبر دی‌الکتریک از ماده‌ای دی‌الکتریک تشکیل شده است که برای انتقال امواج الکترومغناطیسی به کار می‌رود، میله‌های نازکی از این نوع که تار نوری نامیده می‌شوند، در صنعت مخابرات مورد استفاده قرار می‌گیرند.

موجبرهایی که در محدوده‌ی مرئی طیف، امواج الکترومغناطیسی را هدایت می‌کنند موجبرهای اپتیکی نامیده می‌شوند. امروزه موجبرهای اپتیکی نقش اساسی را در خیلی از کاربردها از جمله: اپتیک مجتمع^۵ [۴۱ - ۴۳]،

^۱J.J. Tamson

^۲Lord Reylegh

^۳Sommer Feld

^۴Debye

^۵Integrated Optics