

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



رساله برای دریافت درجه دکتری بیوفیزیک

عنوان

ساخت و مطالعه‌ی بیوفیزیکی نانوساختارهای پلاسمونیک اسید

نوکلئیکی

نگارنده: آزاده عزیزی

استاد راهنما: دکتر بیژن رنجبر

استاد مشاور: دکتر طاهره توحیدی مقدم

بهار ۹۳



بسمه تعالی  
تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

خانم آزاده عزیزی دانشجوی مقطع دکتری رشته بیوفیزیک به شماره دانشجویی ۸۹۵۱۰۲۲۰۰۴ رساله واحدی خود را با عنوان "ساخت و مطالعه بیوفیزیکی نانو ساختارهای پلاسمونیک اسید نوکلئیکی" در تاریخ ۱۳۹۳/۱/۲۷ روز چهارشنبه ساعت ۱۵:۰۰ در اتاق شماره ۵۰۰۹ دانشکده علوم زیستی ارائه کردند. اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده است و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه دکتری پیشنهاد می کنند.

اعضای هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱ - استاد راهنما	آقای دکتر بیژن رنجبر	استاد	
۳ - استاد مشاور	خانم دکتر طاهره توحیدی مقدم	استادیار	
۴ - استاد ناظر داخلی	آقای دکتر پرویز عبدالمالکی	دانشیار	
۵ - استاد ناظر داخلی	آقای دکتر مجید تقدیر	استادیار	
۶ - استاد ناظر خارجی	آقای دکتر عباس شجاع الساداتی	استاد	
۷ - استاد ناظر خارجی	آقای دکتر محمد اسماعیل زیبایی	استادیار	
۸ - نماینده تحصیلات تکمیلی	آقای دکتر پرویز عبدالمالکی	دانشیار	



## آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهش‌های علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرح‌های تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان‌نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می‌باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان‌نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می‌باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین‌نامه های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/۴/۱ شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب..... دانشجوی رشته..... ورودی سال تحصیلی.....  
مقطع..... دانشکده..... متعهد می‌شوم کلیه نکات مندرج در آئین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته‌های علمی مستخرج از پایان‌نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین‌نامه فوق‌الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می‌دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا:.....  
تاریخ: ۹۳/۱/۲۷



### آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:  
«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته سوفیزیک است که در سال ۱۳۹۳ در دانشکده علوم زمین دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی

سرکار خانم/جناب آقای دکتر رنگبر، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر توسیری مقدم از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب آزاده غزری دانشجوی رشته سوفیزیک مقطع دکتری تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: آزاده غزری

تاریخ و امضا: ۹۳، ۱، ۲۷

تقدیم با بوسه

بر دستان مهربان و خسته‌ی پدر و مادرم

به پاس قلب‌های بزرگ و لبریز از محبت

قدردانی

با امتنان فراوان از زحمات ارزشمند دو استاد بزرگوار

جناب آقای دکتر رنجبر

و

خانم دکتر توحیدی مقدم

## چکیده

میان‌کنش نور پلاریزه با پلاسمون سطحی نانوذرات فلزی، شاخه نوینی از فناوری به نام پلاسمونیک را در دانش نانوفوتونیک پدیدآورده است. نقطه قوت این فناوری، قابلیت مهندسی خواص نوری نانوذرات و استفاده از سرعت و ظرفیت فوتونیک در پردازش اطلاعات الکترونی است. به‌منظور افزایش قدرت پلاسمونیک نانوذرات فلزی و تولید ابرساختارها با قابلیت فتوالکترونی مطلوب، چیدمان منظم نانوساختارها در الگوهای مناسب از اهمیت خاصی برخوردار است، که مولکول DNA پتانسیل منحصر به فردی در این امر دارد. در این پژوهش، با هدف بررسی اثر شکل نانوذرات بر خواص فتوالکترونیک ساختارهای سازمان‌یافته پلاسمونیک، و بهره‌برداری از خاصیت خودآرایی رشته‌های مکمل DNA، سه سیستم سازمان‌یافته پلاسمونیک اسید نوکلئیکی با استفاده از نانوذرات کروی، میله‌ای و هیبرید این دو طراحی شده است. سامانه‌های مورد نظر به طور کامل با روش‌های مختلف نظیر طیف‌سنجی فرابنفش مرئی، پراکنش نور پویا (DLS)، دورنگ‌نمایی دورانی (CD)، فلورسانس، تبدیل فوریه مادون قرمز و میکروسکوپ الکترونی عبوری مورد بررسی قرار گرفتند. پس از سازماندهی، نتایج طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی برای هر سه سیستم پلاسمونیک، جابجایی شدید طول موج رزونانس نانوذرات را به سمت نواحی قرمز نشان داد. بر اساس مطالعات دورنگ‌نمایی دورانی، به‌دلیل برهم‌کنش بین سیگنال‌های CD ملکول DNA با مدهای هیبریداسیون پلاسمونی نانوذرات سازمان‌یافته، سیگنال‌های CD در نواحی طول موج رزونانس نانوذرات پدیدار شد که شدت و مکان آن‌ها وابسته به شکل نانوذرات بوده و در هر یک از سه سیستم پلاسمونیک متفاوت بود. مقایسه میزان پایداری با کمک مطالعات فلورسانس نیز نشان داد که سیستم پلاسمونیک هیبرید دو نانوذره کروی و میله‌ای نسبت به دو سیستم پلاسمونیک جداگانه از پایداری بیشتری برخوردار است. بر اساس دستاوردهای این پژوهش، مولکول DNA نه‌تنها عامل اصلی هدایت و کنترل فرایند سازماندهی نانوذرات پلاسمونیک است، بلکه تاثیر خواص الکترونی این مولکول به‌عنوان یک دوقطبی کایرال در تعیین قابلیت‌های فتوالکترونیک و نیز کیفیت سیستم‌های پلاسمونیک، بسیار پررنگ است.

**واژگان کلیدی:** سازماندهی، نانوذرات طلا، تشدید پلاسمون سطحی، اسید نوکلئیک، دورنگ‌نمایی

دورانی پلاسمونیک



## فهرست مطالب

### فصل اول - مقدمه

- ۱-۱. فناوری پلاسمونیک ..... ۲
- ۲-۱. پدیده‌ی رزونانس پلاسمون‌های سطحی ..... ۳
- ۳-۱. قوانین فیزیکی حاکم بر رزونانس پلاسمون سطحی نانوذرات پلاسمونیک ..... ۶
- ۴-۱. نانوذرات پلاسمونیک و اهمیت آنها ..... ۷
- ۵-۱. تئوری هیبریداسیون پلاسمون ..... ۸
- ۶-۱. نوساختارهای پلاسمونیک ..... ۱۱
- ۷-۱. روش‌های سازماندهی نانوذرات پلاسمونیک ..... ۱۲
- ۱-۷-۱. کریستالوگرافی ..... ۱۲
- ۲-۷-۱. لیتوگرافی نانوذرات کروی (Nanosphere Lithography) ..... ۱۳
- ۳-۷-۱. استفاده از ابر مولکول‌های زیستی ..... ۱۴
- ۴-۷-۱. طریقه‌ی سازماندهی نانوذرات با کمک رشته‌های مکمل DNA ..... ۱۸
- ۸-۱. مطالعه‌ی خصوصیات نوری و شیمی-فیزیکی سیستم‌های پلاسمونیک ..... ۱۹
- ۹-۱. کاربردهای نانوساختارهای پلاسمونیک اسید نوکلئیکی ..... ۲۱
- ۱۰-۱. دو رنگ‌نمایی دورانی پلاسمونیک (Plasmonic Circular Dichroism) ..... ۲۳
- ۱۱-۱. کلیات و اهداف ..... ۲۹

### فصل دوم - مواد و روش‌ها

- ۱-۲. مواد ..... ۳۲
- ۲-۲. سازماندهی نانوذرات طلا با کمک توالی‌های مکمل DNA ..... ۳۴

#### بخش اول: سازماندهی نانوذرات کروی طلا

- ۱-۲-۲. سنتز نانوذرات کروی ..... ۳۴
- ۲-۲-۲. تخلیص نانوذرات کروی طلا و شناسایی جزئیات ..... ۳۴
- ۳-۲-۲. کونژوگه کردن نانوذرات طلا با رشته‌های DNA ..... ۳۵
- ۴-۲-۲. تهیه‌ی محلول DNA لینکر ..... ۳۷
- ۵-۲-۲. سازماندهی نانوذرات کروی ..... ۳۷

#### بخش دوم: سازماندهی نانوذرات میله‌ای طلا

- ۶-۲-۲. سنتز نانوذرات میله‌ای طلا ..... ۳۸
- ۷-۲-۲. تخلیص نانوذرات میله‌ای و شناسایی آنها ..... ۳۹

- ۸-۲-۲. کونژوگه کردن رشته‌های DNA به نانوذرات میله‌ای طلا..... ۳۹
- ۹-۲-۲. سازماندهی نانو میله‌های طلا..... ۴۰

### بخش سوم: سیستم پلاسمونیک هیبرید حاوی مخلوط نانوذرات کروی و میله‌ای طلا

- ۱۰-۲-۲. سازماندهی محلول هیبرید نانوذرات کروی و میله‌های طلا..... ۴۲
- ۳-۲. مطالعات ساختاری..... ۴۲
- ۱-۳-۲. مطالعات دورنگ‌نمایی دورانی..... ۴۲
- ۱-۱-۳-۱. مطالعات دورنگ‌نمایی دورانی ناحیه‌ی فرابنفش..... ۴۳
- ۲-۱-۳-۱. پایدار دورنگ‌نمایی دورانی پلاسمونیک..... ۴۳
- ۲-۳-۲. مطالعات طیف سنجی مادون قرمز-تبدیل فوریه (FT-IR)..... ۴۳
- ۴-۲. مطالعات فلورسانس..... ۴۴
- ۵-۲. مطالعات Real Time Fluorescence..... ۴۵
- ۶-۲. مطالعات پراکنش نور پویا (DLS)..... ۴۶

### فصل سوم - نتایج

#### بخش اول: سازماندهی نانوذرات کروی طلا با کمک رشته‌های مکمل DNA

- ۱-۳. مطالعات طیف‌سنجی فرابنفش و الگوی سازماندهی نانوذرات کروی..... ۴۸
- ۲-۳. مطالعات ساختاری..... ۵۴
- ۱-۲-۳. مطالعات دورنگ‌نمایی دورانی ناحیه‌ی فرابنفش..... ۵۴
- ۲-۲-۳. مطالعات دورنگ‌نمایی دورانی پلاسمونیک..... ۵۷
- ۳-۲-۳. مطالعات طیف‌سنجی مادون قرمز-تبدیل فوریه (FT-IR)..... ۶۰
- ۳-۳. مطالعات فلورسانس و Real Time Fluorescence..... ۶۱
- ۴-۳. روش‌های ردیابی تغییرات شکل و اندازه‌ی نانوذرات پس از سازماندهی..... ۶۶
- ۱-۴-۳. تصویربرداری میکروسکپ الکترونی عبوری..... ۶۶
- ۲-۴-۳. مطالعات پراکنش نور پویا..... ۶۷

#### بخش دوم: سازماندهی نانومیله‌های طلا با کمک رشته‌های مکمل DNA

- ۵-۳. مطالعات طیف‌سنجی UV-Visible و الگوی سازماندهی نانوذرات کروی..... ۷۰
- ۶-۳. مطالعات دورنگ‌نمایی دورانی..... ۷۵
- ۱-۶-۳. مطالعات دورنگ‌نمایی دورانی ناحیه‌ی Far-UV..... ۷۵
- ۲-۶-۳. مطالعات دورنگ‌نمایی دورانی پلاسمونیک..... ۷۷
- ۷-۳. مطالعات فلورسانس و Real Time Fluorescence..... ۸۰
- ۸-۳. مطالعات پراکنش نور پویا..... ۸۳

## بخش سوم: سازماندهی ساختارهای هیبرید نانوذرات کروی و میله‌ای طلا

- ۹-۳. مطالعات طیف‌سنجی UV-Visible و الگوی سازماندهی سیستم‌های هیبرید ..... ۸۵
- ۱۰-۳. مطالعات دورنگ‌نمایی دورانی پلاسمونیک ..... ۸۷
- ۱۱-۳. مطالعات فلورسانس و Real Time Fluorescence ..... ۸۸
- ۱۲-۳. روش‌های ردیابی تغییرات شکل و اندازه‌ی ساختارهای هیبرید ..... ۹۲
- ۱-۱۲-۳. تصویربرداری میکروسکپ الکترونی ..... ۹۲
- ۲-۱۲-۳. مطالعات پراکنش نور پویا ..... ۹۲

## فصل چهارم - بحث و نتیجه‌گیری

- ۱-۴. بحث ..... ۹۵
- ۲-۴. نتیجه‌گیری ..... ۱۱۰
- ۳-۴. پیشنهادات ..... ۱۱۱
- فهرست منابع ..... ۱۱۲

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱. نمایش جهت انتشار امواج الکترومغناطیس از سطح فلزات ..... ۵
- شکل ۱-۲. مراحل روش لیتوگرافی با کمک نانوذرات کروی سیلیسی ..... ۱۴
- شکل ۱-۳. نمایش انواع نانو ساختارهای پلاسمونیک ..... ۱۷
- شکل ۱-۳. طیف فرابنفش-مرئی نانوذرات کروی طلا ..... ۴۹
- شکل ۲-۳. تصویر شماتیک نحوه‌ی سازماندهی نانوذرات کروی طلا ..... ۵۰
- شکل ۳-۳. تغییرات جذب SPR نانوذرات کروی پس از کونژوگه شدن با مولکول DNA ..... ۵۱
- شکل ۳-۴ (الف). تغییرات شدت جذب دورشته‌ی DNA لینکر قبل و بعد از هیبریداسیون ..... ۵۲
- شکل ۳-۴ (ب). تغییرات طول موج SPR نانوذرات کروی طلا، پیش و پس از سازماندهی ..... ۵۲
- شکل ۳-۵ (الف). سیگنال‌های CD دورشته‌ی DNA لینکر در مقایسه با تکرشته‌های آن ..... ۵۴
- شکل ۳-۵ (ب). تغییر سیگنال‌های CD رشته‌های الیگونوکلوئوتیدی تیوله پس از کونژوگه ..... ۵۵
- شکل ۳-۵ (ج). تغییرات سیگنال‌های CD رشته‌های مکمل DNA در فرآیند سازماندهی ..... ۵۶
- شکل ۳-۶ (الف). مقایسه سیگنال‌های پلاسمونیک CD نانوذرات کروی طلا و DNA ..... ۵۷
- شکل ۳-۶ (ب). سیگنال‌های CD نانوذرات کروی طلا پیش و پس از میان‌کنش با DNA ..... ۵۸
- شکل ۳-۶ (ج). تقویت سیگنال‌های پلاسمونیک CD در فرآیند سازماندهی نانوذرات کروی ..... ۵۹
- شکل ۳-۷. طیف FT-IR رشته‌های DNA پیش و پس از میان‌کنش با سطح نانوذرات کروی ..... ۶۱
- شکل ۳-۸. تغییرات شدت فلورسانس هیبریداسیون رشته‌های مکمل DNA ..... ۶۲
- شکل ۳-۹ (الف). سینتیک تغییرات شدت فلورسانس در سازماندهی نانوذرات کروی طلا ..... ۶۳
- شکل ۳-۹ (ب). تغییرات شدت فلورسانس هیبریداسیون رشته‌های DNA در غیاب نانوذرات ..... ۶۴
- شکل ۳-۱۰. ترموگرام فلورسانس نانو ساختارهای سازمان‌یافته در غلظت‌های مختلف لینکر ..... ۶۵
- شکل ۳-۱۱. تصاویر میکروسکپ الکترونی عبوری نانوذرات کروی طلا پس از سازماندهی ..... ۶۶
- شکل ۳-۱۲ (الف). نتایج پراکنش نور پویا پیش از سازماندهی نانوذرات کروی طلا ..... ۶۷
- شکل ۳-۱۲ (ب). نتایج پراکنش نور پویا پس از سازماندهی نانوذرات کروی طلا ..... ۶۸
- شکل ۳-۱۳ (الف). سنجش تغییرات بار سطحی نانوذرات کروی قبل از سازماندهی ..... ۶۸
- شکل ۳-۱۳ (ب). سنجش تغییرات بار سطحی نانوذرات کروی پس از سازماندهی ..... ۶۹
- شکل ۳-۱۴ (الف). طیف فرابنفش-مرئی رزونانس پلاسمون‌های سطحی نانومیله‌های طلا ..... ۷۱
- شکل ۳-۱۴ (ب). تصویر شماتیک سازماندهی نانو میله‌های طلا با کمک رشته‌های DNA ..... ۷۱
- شکل ۳-۱۵ (الف). طیف SPR نانومیله‌های طلا پس از میان‌کنش با رشته‌های DNA ..... ۷۲
- شکل ۳-۱۵ (ب). تغییرات جذب نانومیله‌های طلا بعد از گذشت مدت زمان ۴۸ ساعت ..... ۷۳
- شکل ۳-۱۵ (ج). تغییرات SPR طولی و عرضی نانومیله‌های طلا پس از سازماندهی ..... ۷۴
- شکل ۳-۱۶ (الف). طیف‌های دورنگ نمایی دورانی رشته‌های پس از کونژوگه شدن ..... ۷۵
- شکل ۳-۱۶ (ب). تغییرات سیگنال‌های CD رشته‌های مکمل DNA در سازماندهی نانومیله‌ها ..... ۷۶



- شکل ۳-۱۷ (الف). سیگنال‌های پلاسمونیک CD نانومیله و مقایسه‌ی آن با نانوذرات کروی.....۷۷
- شکل ۳-۱۷ (ب). طیف‌های پلاسمونیک CD نانومیله‌های طلا پس از فرآیند سازماندهی.....۷۹
- شکل ۳-۱۸. تغییرات شدت فلورسانس رشته‌های DNA در سازماندهی نانومیله‌های طلا.....۸۱
- شکل ۳-۱۹ (الف). سینتیک تغییرات شدت فلورسانس در سازماندهی نانوذرات میله‌ای.....۸۲
- شکل ۳-۱۹ (ب). ترموگرام شدت فلورسانس نانو ساختارهای سازمان یافته‌ی نانومیله‌ی طلا.....۸۳
- شکل ۳-۲۰ (الف). نتایج پراکنش نور پویا پیش از سازماندهی نانومیله‌های طلا.....۸۴
- شکل ۳-۲۰ (ب). نتایج پراکنش نور پویا پس از سازماندهی نانومیله‌های طلا.....۸۴
- شکل ۳-۲۱ (الف). مقایسه شدت جذب و طول موج SPR نانوذرات طلا.....۸۶
- شکل ۳-۲۱ (ب). الگوی شماتیک سازماندهی سیستم هیبریدی کروی- میله‌ای.....۸۶
- شکل ۳-۲۱ (ج). مقایسه شدت جذب SPR نانوذرات طلا در ساختارهای سازماندهی شده.....۸۷
- شکل ۳-۲۲. تغییرات سیگنال‌های CD پلاسمونیک در سیستم هیبرید پلاسمونیک.....۸۸
- شکل ۳-۲۳. مقایسه شدت فلورسانس در سه سیستم سازماندهی شده.....۸۹
- شکل ۳-۲۴ (الف). تغییرات شدت فلورسانس پیکوگرین در نانو ساختارهای هیبرید.....۹۰
- شکل ۳-۲۴ (ب). ترموگرام شدت فلورسانس سیستم‌های هیبرید.....۹۱
- شکل ۳-۲۴ (ج). مقایسه پایداری دمایی سه سیستم سازماندهی شده.....۹۱
- شکل ۳-۲۵. تصویر میکروسکپ الکترونی عبوری سیستم سازمان یافته‌ی هیبریدی.....۹۲
- شکل ۳-۲۶ (الف). تغییرات اندازه‌ی سیستم سازماندهی شده هیبرید پیش از سازماندهی.....۹۳
- شکل ۳-۲۶ (ب). تغییرات اندازه‌ی سیستم سازماندهی شده هیبرید پس از سازماندهی.....۹۳
- شکل ۴-۱. مدهای هیبریداسیون پلاسمون عرضی (بالا) و طولی (پایین).....۹۷
- شکل ۴-۲. ساختار مولکول پیکوگرین و نحوی اتصال به دورشته‌ی DNA.....۱۰۸

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۲-۱. مواد مصرفی به همراه شرکت تولیدکننده آنها..... ۳۲
- جدول ۲-۲. فهرست دستگاه‌های مورد استفاده..... ۳۳
- جدول ۲-۳. توالی رشته‌های DNA و تغییرات آنها از سمت ۳ به ۵..... ۳۳

# فصل اول

مقدمه

## ۱-۱. فناوری پلاسمونیک

امروزه طراحی و تولید نانوساختارهایی که قابلیت هدایت و تمرکز نور در ابعاد زیر طول موج<sup>۱</sup> را دارا باشند، برای ایجاد هم‌افزایی<sup>۲</sup> لازم بین پدیده‌های فتوالکترونیکی، به یک فناوری<sup>۳</sup> فراگیر و به‌روز در اغلب حوزه‌های دانش و صنعت نانو تبدیل شده است (۱-۳). شاخه‌ای از علم نانوفوتونیک که با بهره‌جستن از رویدادهای منحصر به فرد حاصل از میان‌کنش نور قطبیده با سطح نانوذرات فلزی، به مهندسی نور در ابعاد نانو می‌پردازد، پلاسمونیک نامیده می‌شود. تمرکز اصلی فناوری پلاسمونیک هدایت و تقویت نور در ابعاد نانو با هدف انتقال و پردازش اطلاعات الکترونی با سرعت نور است. پلاسمونیک را گاهی به دلیل بهره‌جستن از سطح نانوذرات فلزی، نانومتالیک نیز می‌نامند [۱، ۴، ۵].

نوسان جمعی الکترون‌های لایه هدایت<sup>۴</sup> نانوذرات فلزی، پلاسمون سطحی<sup>۵</sup> نام دارد که شرط لازم تمرکز نور در سطح این نانوذرات است. بنابراین، نقطه‌ی قوت فناوری پلاسمونیک، دست‌ورزی و بهینه‌سازی عملکرد پلاسمون سطحی نانوذرات برای طراحی نانوساختارهای فتوالکترونیکی با قابلیت مطلوب است [۶]. در حال حاضر، با استفاده از این فناوری مدارهای نوری با اندازه‌ی مدارهای الکترونی طراحی شده است که ظرفیت آنها یک میلیون برابر بیشتر است. در حقیقت، برای طراحی این مدارها، سرعت و ظرفیت فوتونیک با اندازه‌ی کوچک مدارهای الکترونی ترکیب شده است [۷، ۸].

---

<sup>۱</sup> - Sub-wavelength  
<sup>۲</sup> - Synergy  
<sup>۳</sup> - Technology  
<sup>۴</sup> - Conduction Band  
<sup>۵</sup> - Surface Plasmon



## ۲-۱. پدیده رزونانس پلاسمون سطحی

اساس فیزیکی میان کنش بین نور و فلزات بر پایه‌ی مجموعه معادلات ماکسول<sup>۱</sup> تعریف شده و بدین وسیله شرح داده می‌شود [۹]. به طور کلی، سطح فلزات نسبت به میدان‌های الکترومغناطیس امواج فرودی نفوذ-پذیری بسیار اندکی نشان می‌دهند و بنابراین سبب بازتاب شدید امواج فرودی می‌شوند. با وجود این ویژگی، در فرکانس‌های نزدیک نور مرئی و مادون قرمز نزدیک<sup>۲</sup>، میان کنش بین نور با سطح فلزات سبب ایجاد پاسخ دی‌الکتریک در فلز شده و به پلاسمون سطحی آن فرصت قطبش‌پذیری<sup>۳</sup> می‌دهد [۱۰]. قطبش‌پذیری (P) آرایش بارهای سطحی فلز به صورت دو قطبی‌های منظم در برابر میدان الکترومغناطیس امواج فرودی است و از طریق اندازه حرکت دو قطبی الکترونیکی<sup>۴</sup> در واحد حجم فلز محاسبه می‌شود. میزان قطبش‌پذیری فلزات بر اساس رابطه‌ی (۱-۱) با اندازه‌ی میدان الکترونیکی (E) امواج فرودی، چگالی بارهای سطحی فلز (J) و نیز هدایت‌پذیری آن ( $\sigma$ ) نسبت مستقیم دارد:

$$P = E \cdot J \cdot \sigma \quad \text{رابطه (۱-۱)}$$

علاوه بر این، قطبش‌پذیری پلاسمون سطحی با کنترل خاصیت دی‌الکتریک فلز انجام می‌شود، این خاصیت که با  $\epsilon$  نشان داده می‌شود تابعی از ضریب تحریک فلز (K) و فرکانس امواج فرودی ( $\omega$ ) است. ضریب تحریک فلز نیز میزان جذب نوری و همچنین انتشار امواج الکترومغناطیس بر سطح آن را نشان می‌دهد:

$$K = \epsilon / 2n \quad \text{رابطه (۲-۱)}$$

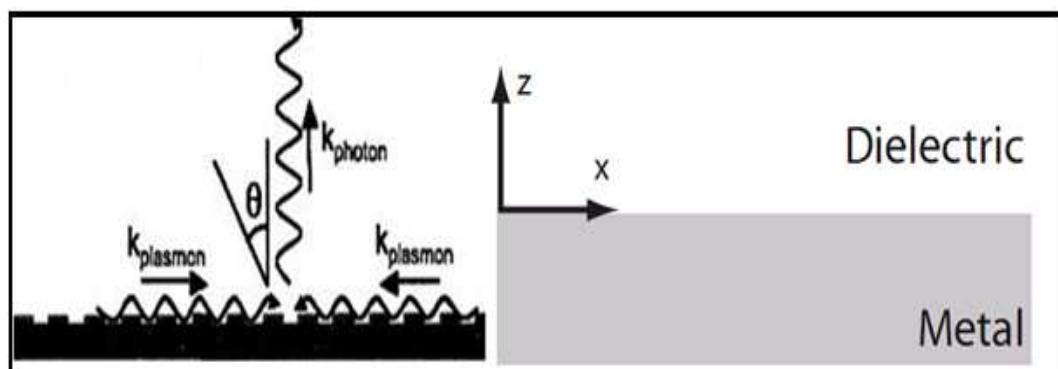
---

<sup>۱</sup>- Maxwell  
<sup>۲</sup>- Near-Infra Red  
<sup>۳</sup>- Polarization  
<sup>۴</sup>- Electric Dipole Momentum

در رابطه‌ی (۱-۲)،  $n$  ضریب شکست فلز است، قسمت حقیقی  $\epsilon$  مقداری از موج الکترومغناطیس است که توسط فلز و قسمت مجازی آن نیز توسط محیط جذب می‌شود. بنابراین فلزات با ضریب تحریک بالاتر، انرژی بیشتری را برای قطبش‌پذیری لازم دارند [۹، ۱].

پاسخ پلاسمون سطحی در لحظه‌ی برهم‌کنش بین موج الکترومغناطیس و سطح فلز، به فرکانس موج فرودی وابسته است. این فرکانس، فرکانس برخورد<sup>۱</sup> ( $\gamma$ ) نام دارد و برابر با  $1/\tau^{12}$  است. در این رابطه  $\tau$  زمان آسایش<sup>۲</sup> پلاسمون سطحی فلز است، همچنین، مقدار  $\gamma$  بسته به دما متفاوت خواهد بود و معمولاً در دمای اتاق،  $\gamma$  برابر با ۱۰۰ THz است [۹، ۱۰]. از طرفی پلاسمون سطحی فلز نیز با فرکانس معینی به نام فرکانس پلاسمون ( $\omega_p$ )، در حال نوسان می‌باشند که برای اکثر فلزات  $\omega_p$  در ناحیه مرئی و مادون قرمز نزدیک (۴۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر) است.

در لحظه‌ی برهم‌کنش اگر فرکانس برخورد موج تابشی کمتر از فرکانس پلاسمون باشد ( $\omega_\gamma < \omega_p$ )، انرژی موج در داخل فلز میرا می‌شود و در صورتی که فرکانس برخورد موج بیشتر از فرکانس پلاسمون باشد ( $\omega_\gamma > \omega_p$ )، موج الکترومغناطیس در سطح فلز منتشر می‌شود که به این حالت پولاریتون یا گسیل پلاسمون سطحی<sup>۳</sup> (SPP) گویند. در واقع، SPP انتشار فوتون‌های موج الکترومغناطیس در فصل مشترک بین فلز و دی‌الکتریک اطراف آن است و جهت انتشار آن بر اساس شکل ۱-۱ عمود بر سطح بین فلز و دی‌الکتریک اطراف آن می‌باشد [۹، ۱۰].



<sup>۱</sup> - Contact Frequency  
<sup>۲</sup> - Relaxation Time  
<sup>۳</sup> - Surface Plasmon Polariton

شکل ۱-۱. نمایش جهت انتشار امواج الکترومغناطیس: محور Z جهت حرکت SPP را نشان می‌دهد که عمود بر سطح بین فلز و دی‌الکتریک است. زاویه  $\theta$  اختلاف بین زاویه تابش موج فرودی و انتشار موج خروجی است.

هنگامی که فرکانس موج فرودی برابر با فرکانس نوسان پلاسمون باشد ( $\omega_p = \omega$ )، تمامی انرژی موج توسط الکترون‌های لایه هدایت فلز جذب شده و سبب تشدید نوسانات پلاسمون سطحی آن می‌شود که به این پدیده رزونانس پلاسمون‌های سطحی مستقر<sup>۱</sup> (LSPR) گویند. در حقیقت در این فرکانس، تحریک نوسانات پلاسمون بر علیه بارهای مثبت هسته سبب القای دوقطبی در نانوذرات فلزی و در نتیجه ایجاد چگالی بار ( $\sigma_{net}^+$ ) بر سطح آن می‌شود، که میزان چگالی بار به قدرت میدان الکتریکی موج تابشی و ضریب دی‌الکتریک فلز وابسته است.

پدیده رزونانس پلاسمون سطحی سبب القای دو بردار موج در سطح فلز می‌شود؛ یک بردار موج مختص میدان الکتریکی موج تابشی است که انرژی آن سبب رزونانس پلاسمون‌های سطحی فلز می‌شود و به آن بردار موج میرا شونده ( $K_{ev}$ ) گویند. مقدار این بردار، برابر است با:

$$K_{ev} = \frac{\omega_0}{c} \eta_g \sin\theta \quad \text{رابطه (۳-۱)}$$

در رابطه (۳-۱)،  $\omega$  فرکانس نور تابشی،  $c$  سرعت نور،  $\eta_g$  ضریب شکست محیط با چگالی بالا می‌باشد و  $\theta$  زاویه تابش نور است. عمق نفوذ میدان الکتریکی در سطح فلز بیشتر از ۳۰۰ نانومتر نیست و به دلیل اینکه انرژی آن با افزایش فاصله از سطح فلز به صورت نمایی کاهش می‌یابد، به آن بردار موج میدان الکتریکی کاهشی یا میرا<sup>۲</sup> می‌گویند. بردار موج دوم ( $K_{sp}$ ) مختص پلاسمون سطحی فلز بوده و برابر است با:

$$K_{ev} = \frac{\omega_0}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m \eta_s^2}{\epsilon_m + \eta_s^2}} \quad \text{رابطه (۴-۱)}$$

در رابطه بالا،  $\epsilon_m$  ضریب دی‌الکتریک محیط و  $\eta_s$  ضریب شکست پلاسمون‌های سطحی فلز است، بنابراین  $K_{sp}$  به ضریب دی‌الکتریک محیط پیرامون پلاسمون‌های سطحی بسیار حساس است و هر گونه تغییر در

<sup>۱</sup> - Localized Surface Plasmon Resonance

<sup>۲</sup> - Evanescent Electrical Field

محیط سبب تغییر در مقدار این وکتور می‌شود. از طرفی وقوع SPR در سطح نانوذرات فلزی سبب کاهش ضریب شکست<sup>۱</sup> امواج گسیل شده از سطح فلز می‌شود. به زاویه‌ای از تابش موج که در آن حداکثر کاهش در ضریب شکست موج گسیل شده از سطح فلز اتفاق می‌افتد، زاویه SPR گفته می‌شود. در زاویه SPR مقدار  $K_{sp}$  با  $K_{ev}$  برابر می‌شود. بنابراین، در این زاویه استقرار میدان الکترومغناطیس به صورت فوتون‌های رزونانت در سطح نانوذرات فلزی، تمام خصوصیات تابشی نور نظیر جذب، نشر و پخش امواج الکترومغناطیس را فزونی می‌بخشد که هر یک از این خصوصیات، کاربردهای ویژه دارند [۱۰، ۱۱].

### ۳-۱. قوانین فیزیکی حاکم بر رزونانس پلاسمون سطحی نانوذرات پلاسمونیک

۱- شدت جذب در طول موج رزونانس پلاسمون سطحی نانوذرات پلاسمونیک با اندازه‌ی قطر آنها نسبت مستقیم دارد.

۲- گستره‌ی طول موج رزونانس پلاسمون سطحی نانوذرات غیر کروی با افزایش تعداد گوشه‌های<sup>۲</sup> موجود در ساختار آنها و در نتیجه افزایش سطوح در دسترس جهت قطبش‌پذیری پلاسمون، فزونی می‌یابد. در حقیقت افزایش تعداد گوشه‌ها در نانوذرات پلاسمونیک سبب افزایش ناهمگونی<sup>۳</sup> ساختار آنها شده و ناهمگونی یک عامل مساعد جهت برانگیختگی پلاسمون در طول موج‌های متفاوت است.

۳- طول موج رزونانس پلاسمون با افزایش قطر نانوذرات دچار جابجایی قرمز می‌شود که علت این جابجایی، افزایش سطح مقطع فلز جهت برانگیختگی پلاسمون می‌باشد.

۴- سطح مقطع برانگیختگی<sup>۴</sup> ( $C_{ext}$ ) نانوذرات فلزی در تابعی از فرکانس موج فرودی و شعاع نانوذرات محاسبه می‌گردد و برابر است با:

$$C_{ext} = 12\pi \frac{\omega R^3 \varepsilon^{\frac{3}{2}}}{c} \cdot \frac{\varepsilon_{(\omega,R)}}{[\varepsilon_{(\omega,R)} + 2\varepsilon_m]^2 + \varepsilon_{(\omega,R)}^2} \quad \text{رابطه (۱-۵)}$$

<sup>۱</sup> - Refractive Index

<sup>۲</sup> - Corners

<sup>۳</sup> - Anisotropy

<sup>۴</sup> - Excitation Cross Section