بسم اللّه الرحمن الرحيم

دانشگاه شهید باهنر کرمان
دانشکده علوم
بخش فیزیک

پایان‌نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

فوتونیک

بررسی عملکرد جفتگرهای نانو رشته ای دی الکتریک بااستفاده از روش های CMTو$FDTD$

استاد راهنما

دکتر حسن فاطمی

مؤلف

زهرا قایدی جهرمی

شهریور ماه ۱۳۹۰

دانشگاه شهید باهنر کرمان

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط احراز درجه کارشناسی ارشد به

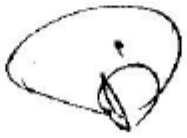
گروه فیزیک

دانشکده علوم

دانشگاه شهید باهنرکرمان

تسلیم شده است و هیچ گونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو: خانم زهرا قایدی جهرمی



استاد راهنما: دکترحسن فاطمی

استاد مشاور:

داور ۱: دکتر عبدالناصر ذاکری

داور ۲: دکترمحمدحسین زندی

نماینده تحصیلات تکمیلی: دکترشهباز رادفر

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر است.

تقدیم به

پدر بزرگوار و مادر مهربانم

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی.

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است.

به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می گراید.

و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند.

تشکر و قدردانی

حرف های ما هنوز ناتمام
تا نگاه می کنی وقت رفتن است
باز هم همان حکایت همیشگی
پیش از آنکه باخبر شوی
لحظه عزیمت تو ناگزیر می شود
ای دریغ و حسرت همیشگی
ناگهان چقدر زود دیر می شود!!!

سپاس خدای را که دریای بیکران علم و رحمت است. آفریدگار بی نیازی که به انسان قدرت تفکر و اندیشیدن و توانایی مهر ورزیدن ارزانی داشت.

زحمات فراوانی که استاد عزیزم در لحظه لحظه این سه سال برای رشد و ترقی و تعالی علمی و اخلاقی اینجانب متحمل شدند را، تا پایان عمر از یاد نخواهم برد و آن را پاس داشته و مراتب قدردانی و سپاسگذاری فراوان خویش را از ایشان ابراز می‌دارم.

برخود لازم می دانم از پدر و مادر بزرگوارم، خواهران وبرادر مهربانم که همواره مرا مشوق و همدم و یار بودند کمال سپاس و قدردانی را به عمل آورم.

همچنین دوستی که در این سه سال همواره از وجودش بهره برده و یار و مونسم بود، شایسته رحمانی و دیگر دوستانم بویژه عباس خاکسار و مهدی کمالی که در تمامی شرایط یاری و مساعدتشان را از من دریغ نداشته اند، سپاسگزارم و برایشان آرزوی پیروزی و سربلندی دارم.

چکیده

در این پایان نامه، عملکرد نانو جفتگرهای اپتیکی متشکل از نانو رشته هایی از جنس های سلیکا، سلیکون و تلوریت مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار از روش تئوری مد جفت شده(CMT)و روش تفاضل محدود در حوزه زمان($FDTD$) استفاده شد. پس از بررسی دو روشCMTو$FDTD$ و رسیدن به روابط مورد نیاز برای محاسبه پارامترهای جفت شدگی در این نانو جفتگرها، به بررسی ویژگی های پارامتری فیزیکی مورد نیاز برای طراحی و ساختن آنها پرداخته شد.

بدلیل وابستگی پارامترهای جفت شدگی در این نانو جفتگرها، به قطبش نور جفت شده به یکی از نانو رشته های سازنده آنها، قبل از بررسی این نانو جفتگرها، اثر قطبش نور جفت شده به یک نانو رشته از جنس سلیکا به روش$FDTD$بررسی شد. سپس اثر قطبش نور منتشره در یکی از بازوهای آن بر روی پارامترهای جفت شدگی اش بدست آورده شد.

با بکار گیری روش (CMT) طول جفت شدگی بهینه در نانو جفتگرهای ساخته شده از دو نانو رشته موازی هم، که در ازای آن می توان بیشترین توان را از یکی از نانو رشته ها به دیگری انتقال داد، محاسبه شده است. همچنین، با به کار گیری روش $FDTD$ به محاسبه بازده جفت شدگی در نانو جفتگر های مفروض پرداخته شده است. با بکارگیری روش های فوق، اثر اندازه قطر نانو رشته های بکار رفته در ساختن نانو جفتگرهای فوق برروی پارامترهای جفت شدگی آنها نیز مطالعه شد.

نتایج بدست آمده از بکارگیری این دو روش، بیانگر نکات قابل توجهی می باشد که می توانند

استفاده کاربردی در طراحی و ساختن اینگونه نانو جفتگرهای دی الکتریکی که کاربردهای روز افزونی در مطالعات میکرو ونانو اپتیک و تکنولوژی فوتونیک دارند، داشته باشند.

فهرست مطالب

تقدیم **ت**

تشکر و قدردانی **ث**

چکیده **ج**

۱ مقدمه **۱**

۱.۱ روش های ساخت میکرو ونانو رشته های لازم برای ساخت نانو جفتگرها . . ۲

۱.۱.۱ روش تراش شیمیایی ۳

۲.۱.۱ روش گرما -کششی همراه با کنترل کامپیوتری ۶

۲.۱ ویژگی های میکرو و نانو رشته های مورد استفاده در ساخت نانو جفتگرها . ۸

۱.۲.۱ تمرکز اپتیکی قوی ۸

۲.۲.۱ میدان های نزدیک سطحی قوی ۸

۳.۲.۱ انعطاف پذیری بالا ۹

۴.۲.۱ اتصال کم تلفات ۹

۵.۲.۱ اثرقطبش نور در انتشار آن در این نانورشته ها ۱۰

۳.۱ کاربردهای این میکرو و نانورشته ها در ساختن افزاره های میکرو و نانو اپتیکی و فو تونیکی ۱۰

۱.۳.۱ جفتگرهای نانو رشته ای (ویا نانو جفتگرهای) دی الکتریک . . ۱۰
۲.۳.۱ درهمروی(ویا تداخل)سنج ها ۱۲
۳.۳.۱ تشدیدکننده ها ۱۲
۴.۳.۱ حسگرها ۱۲

۲ معرفی روش های CMTو$FDTD$ **۱۴**

۱.۲ روش تئوری مد جفت شده(CMT) ۱۶
۲.۲ روش تفاضل محدود در حوزه زمان$(FDTD)$ ۳۲
۱.۲.۲ معرفی نرم افزار $Meep$ ۳۷

۳ نتایج-محاسبه پارامترهای جفت شدگی در نانو جفتگرها با استفاده از... **۴۰**

۱.۳ مربوط به اثرقطبش نور در انتشار آن در یک نانورشته دی الکتریك ۴۲
۲.۳ مربوط به بررسی نانو جفتگرهای دی الکتریکی توسط روش $FDTD$ . . . ۵۱
۳.۳ مربوط به بررسی نانو جفتگرهای دی الکتریکی توسط روش CMT . . . ۶۴

۴ نتیجه گیری و بر داشت کلی **۷۳**

پیوست ها **۷۷**

مراجع **۸۰**

Abatract **۸۵**

فصل ۱

مقدمه

میکرو و نانو رشته های دی الکتریک، رشته های اپتیکی با قطری نزدیک و یا کوچکتر از طول موج نور هدایت شده درآنها هستند. محققان، با توجه به ویژگی های مختلف این گونه رشته ها، نام های گوناگون به آنها داده اند، به عنوان مثال می توان از موجبر(و یا رشته) کوچکتر از طول موج[1] [۱، ۲، ۳]، میکرو (ویا نانو) فیبر اپتیکی[2][۴]، فیبر های نازک شده[3][۵، ۶]، نانو رشته اپتیکی و فوتونیکی[4][۷]نام برد.

در این فصل، ابتدا به معرفی دو روش پر کاربرد ساخت میکرو و نانو رشته ها پرداخته شده است. سپس چند ویژگی مهم در میکرو و نانورشته ها معرفی می شود. سپس افزاره های فوتونیکی کاربردی که بر پایه ویژگی های مختلف میکرو و نانورشته ها ساخته می شوند، معرفی شده اند. در نهایت به بررسی تئوری انتشار نور قطبیده در میکرو و نانو رشته ها پرداخته شده است.

۱.۱ روش های ساخت میکرو ونانو رشته های لازم برای ساخت نانو جفتگرها

تا کنون روش های گوناگونی برای ساخت میکرو و نانو رشته ها گزارش شده است[۸، ۹]. در میان این روش ها، ساخت میکرو و نانو رشته ها از فیبر های نوری، بدلیل ویژگی هایی که این نمونه از میکرو و نانو رشته ها دارند، از اهمیت خاصی برخوردار هستند. از جمله ویژگی های نانو رشته های ساخته شده از فیبرهای نوری می توان به امکان ساختن این افزاره ها با طول بلند و سطحی یکنواخت و هموار را اشاره کرد. سطح هموار و یکنواخت این میکرو و نانو رشته ها تلفات اپتیکی در آنها را کاهش می دهد. در نتیجه، کاربردهای گسترده ای در حسگرهای نوری را فراهم می کند.

---

[1] subwavelength waveguide (or wire)

[2] optical micro (or nano) fiber

[3] tapered fibers

[4] photonic and optical nanowire

دو نمونه از مهمترین روش های ساخت میکرو و نانو رشته های فیبر نوری، روش تراش شیمیایی و روش گرما -کششی همراه با کنترل کامپیوتری هستند. میکرو ونانو رشته هایی که بوسیله این دو روش ساخته می شوند، ساختاری شامل یک رشته کشیده شده نازک می باشند که هر انتهای آنها به یک فیبر نازک شده که سطح مقطع آن مخروطی شکل است، منتهی می شوند. در ادامه به معرفی دو روش نام برده، که در آزمایشگاه میکرو و نانو اپتیک دانشکده فیزیک این دانشگاه، به سر پرستی دکتر حسن فاطمی انجام شده است، پرداخته شده است.

۱.۱.۱ روش تراش شیمیایی

در روش تراش شیمیایی[۱۰]، توانایی ساخت افزاره های میکرو و نانو اپتیکی و فوتونیکی گوناگون، با کاربردهای فراوانی در مطالعات میکرو و نانو تکنولوژی و صنعت مخابرات نوری، وجود دارد. از جمله افزارهایی که توسط این سیستم می‌توان ساخت، میکرو و یا نانو رشته‌های فیبر نوری هستند.

نمایی از سیستم ساخته شده، برای ساخت افزاره های مختلف فوتونیکی فیبر نوری به روش تراش شیمیایی پایدار محافظت شده همراه با کنترل کامپیوتری شرایط فیزیکی، موجود در آزمایشگاه میکرو و نانو اپتیک دانشکده فیزیک این دانشگاه در شکل(۱۰۱) آورده شده است.

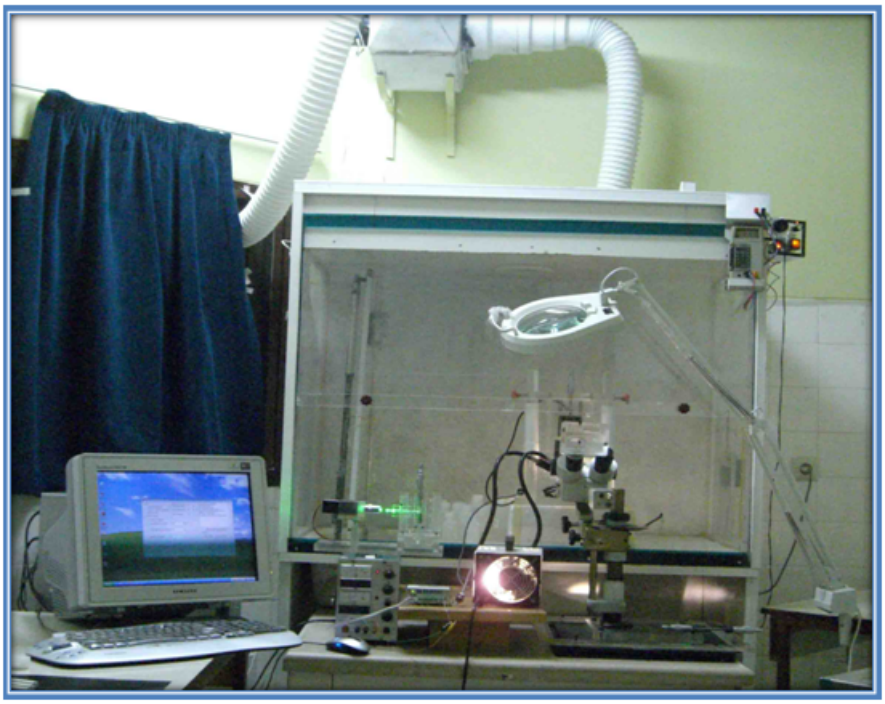
این سیستم چهار بخش اساسی را شامل می‌شود.

۱-اتاقک تراش شیمیایی با کنترل هیدرودینامیکی فشار درون آن

۲- حمام تراش به همراه کنترل الکترونیکی دما، برای تهیه نمونه های مورد نظر

۳- سیستم الکترومکانیکی کامپیوتری برای کنترل موقعیت مکان نمونه‌ها

۴- سیستم مشاهده هم زمان با ضبط کامپیوتری میکروسکوپی فرایند تراش شیمیایی

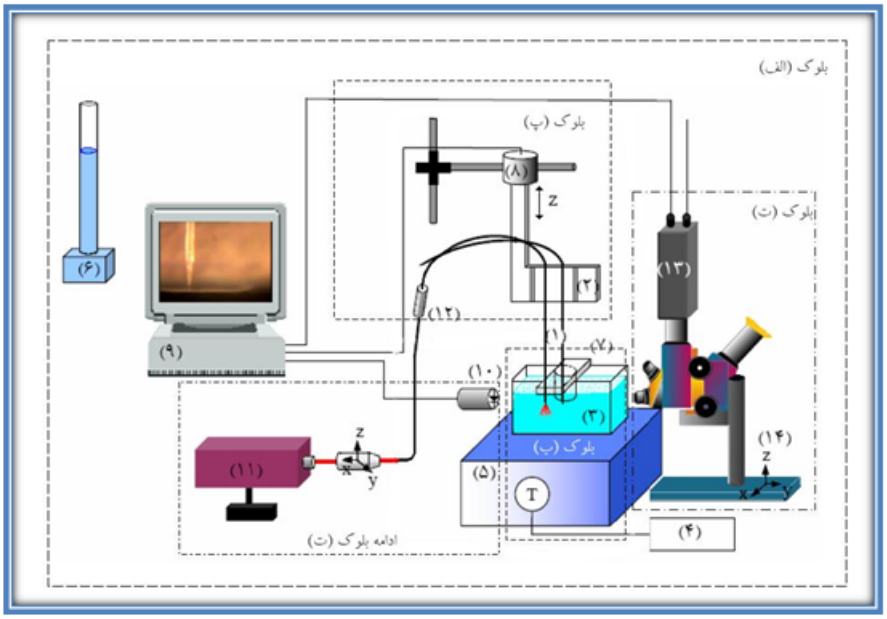


شکل ۱.۱: نمایی از سیستم تراش شیمیایی پایدار محافظت شده همراه با کنترل الکترومکانیکی کامپیوتری شرایط فیزیکی[۱۰].

شکل(۱.۲) تصویر الگوواری از این سیستم را نشان می دهد.

در شکل (۱.۲)، بلوک (الف) اطاقک تراش شیمیایی با کنترل الکترومکانیکی کامپیوتری شرایط فیزیکی را نشان می‌دهد که فرایند ساخت در این اطاقک ایزوله شده از محیط انجام می‌شود. بلوک (ب) سیستم حمام تراش را نشان می دهد. این قسمت شامل ظرف محلول تراش، (۳)، ظرف نگه دارنده ماده محافظ، (۷)، و سیستم کنترل الکترونیکی دمای حمام، (۴)، همراه با چشمه گرمادهنده، (۵)، است. بلوک (پ) سیستم الکترومکانیکی کامپیوتری برای کنترل موقعیت مکانی نمونه‌ها که در واقع نگهدارنده فیبرها نیز است، را نمایش می‌دهد. نگه دارنده فیبرها، (۲)،که نمونه فیبرها، (۱)، بر آن سوار است، به همراه یک قسمت کنترل الکترومکانیکی، (۸)، که توسط کامپیوتر، (۹)، کنترل میشود اجزای این بخش را تشکیل می‌دهند. بلوک (ت) سیستم ردیابی مکان نوک فیبر و تصویر برداری هم‌زمان با فرایند ساخت نمونه‌ها را نشان میدهد. در این سیستم دوربینCCD، (۱۳)که بر روی میکروسکوپ، (۱۴)، سوار شده است، وظیفه انتقال تصویر نمایش دهنده چگونگی فرایند تراش را به کامپیوتر بر عهده دارد. نوک واقع شده

در محلول تراش فیبر نوری توسط یک لیزر حالت جامد، (۱۱)، نوردهنده می‌شود. با استفاده از این نور، مکان نوک نمونه ها را آسانتر تشخیص داده، همچنین با دیدن نور خروجی از آن می‌توان شکل یافتن چشمه نوری ساخته شده را دیده بانی کرد.



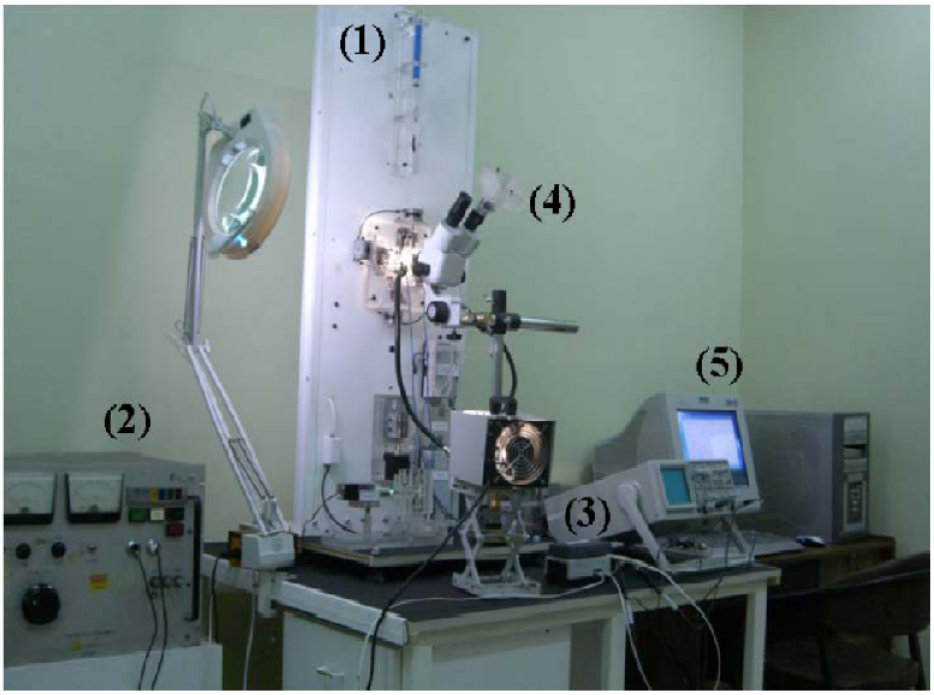
شکل ۲.۱: نمایش الگووار سیستم تراش شیمیایی پایدار محافظت شده همراه با کنترل الکترومکانیکی کامپیوتری شرایط فیزیکی برای ساخت ادوات میکرو و/یا نانو اپتیکی فیبر نوری که بخشهای آن توسط خط‌چین از یکدیگر مجزا شده اند[۱۱].

برای ساخت میکرو رشته‌های فیبر نوری (و یا فیبر نوری کمر باریک شده)، ابتدا روکش تفلونی فیبر از قسمتی که قرار است تراشیده شود، جدا می شود. پس از این کار، نمونه آماده تراش، روی پایه‌ی نگه دارنده، به شکل U نصب شده، به گونه‌ای که در قسمت پایین U شکل، ناحیه‌ای از نمونه ها که روکش آن برداشته شده قرار داده می شود. توسط سیستم کنترل الکترومکانیکی مکان نمونه، نمونه به اندازه مشخص وارد محلول تراش می شود. پس از آنکه زمان رسیدن به قطر مورد نظر به سر رسید، نمونه از محلول بیرون کشیده می شود. در بیرون آوردن نمونه از محلول اثرکشش سطحی که مانع بیرون آوردن آن از محلول می شود را در نظرگرفته می گیریم. بنابراین، این مرحله از کار با ملایمت و ظرافت انجام می‌شود.

۲.۱.۱ روش گرما -کششی همراه با کنترل کامپیوتری

در این بخش به معرفی مختصری از روش گرما-کششی همراه با کنترل کامپیوتری، که برای ساخت میکرو و نانو رشته استفاده می شود، پرداخته شده است[۱۲].

نمایی از سیستم ساخته شده، برای ساخت افزاره های مختلف فوتونیکی فیبر نوری به روش گرما- کششی همراه با کنترل کامپیوتری ، در شکل(۳۰۱) آورده شده است.



شکل ۳.۱: نمایی از سیستم گرما-کششی جرقه ای همراه با کنترل الکترومکانیکی کامپیوتری[۱۳].

این سیستم پنج بخش اساسی به شرح زیر را شامل می شود.

۱-برج کشش

۲-سیستم تولید، به همراه کنترل کامپیوتری، ولتاژهای بالای ACوDCپالسی شکل

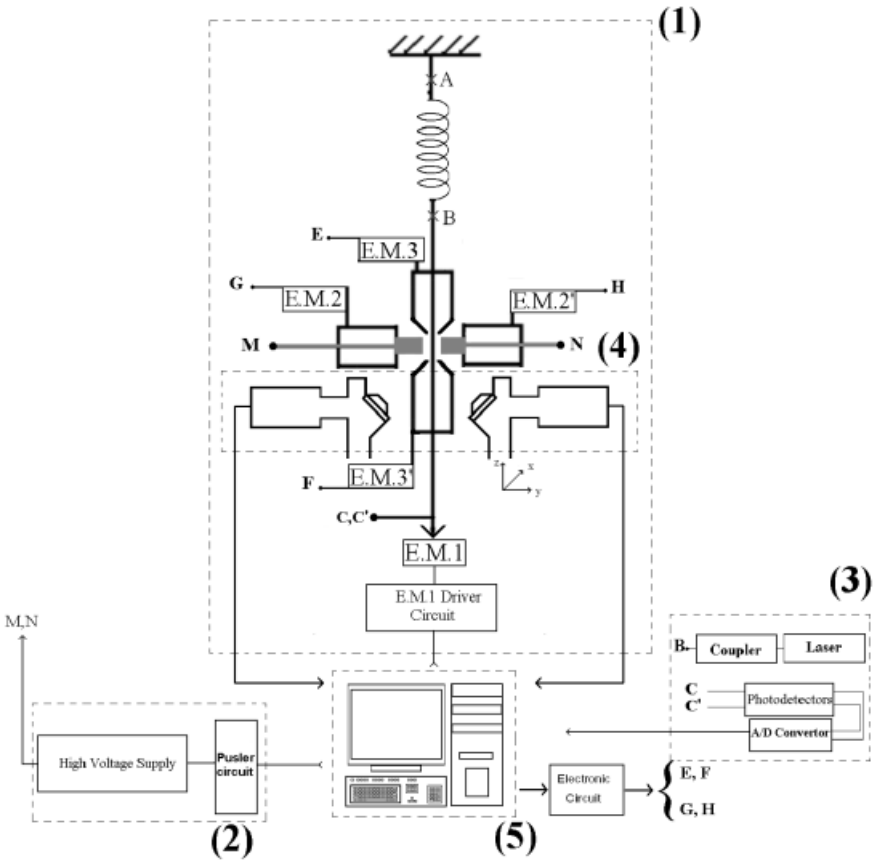
۳-سیستم کنترل کامپیوتری برای ساخت قطعه های مختلف فوتونیکی

۴-سیستم دیدن همزمان با نگاشت کامپیوتری میکروسکوپی فرایند ساخت

۵-کامپیوتر فرمان دهنده و نگاشت مراحل ساخت

شکل(۴۰۱) تصویر الگوواری از این سیستم را نشان می دهد.

در شکل(۴۰۱)، بلوک(۱)، برج کشش، بلوک(۲)،سیستم تولید ولتاژهایACوDC، بلوک(۳)، سیستم دیدن هم زمان با نگاشت کامپیوتری میکروسکوپی فرایند ساخت نمونه ها، بلوک(۴)، لیزر به همراه حسگر نوری به ابتدای نمونه فیبر نوری و آشکار سازی نور خروجی سر انتخابی نمونه، بلوک(۵)، کامپیوتر فرمان دهنده و نگاشت مراحل ساخت نمونه را نشان می دهد.



شکل ۴.۱: طرح الگو وار سیستم گرما-کششی جرقه ای همراه با کنترل کامپیوتری[۱۳].

برای ساختن میکرورشته های فیبر نوری می بایستی چیدمان ویژه این فرایند ساخت را فراهم نموده و بر روی برج کشش سوار شود. برای ساخت میکرو و نانورشته های فیبر نوری، توسط سیستم گرما -کششی جرقه ای همراه با کنترل کامپیوتری، سیستم الکترومکانیکی اعمال نیروی کشش در قسمت پایین برج کشش قرار داده می شود، و سر انتهایی نمونه فیبر نوری به آن متصل می شود. با اعمال نیروی کشش پیش و یا پس از اعمال جرقه الکتریکی، میکرو و نانورشته های فیبر نوری مورد نظر ساخته می شوند.

۲.۱ ویژگی های میکرو و نانو رشته های مورد استفاده در ساخت نانو جفتگرها

بدلیل قطر کوچک میکرو و نانو رشته ها و تفاوت زیاد نمار شکست بین آنها و محیط اطرافشان، که معمولا بیشتر از ۱/۵ است، ویژگی های جالب اپتیکی درآنها دیده می شود. این ویژگی ها باعث شده است، انواع افزاره های اپتیکی و فوتونیکی از آنها ساخته شود. از جمله این ویژگی ها می توان از میدان های نزدیک سطحی بزرگ[۱]،تمرکز اپتیکی قوی[۲]، انعطاف پذیری بالا[۳] و اتصال کم تلفات[۴] را نام برد[۱۴، ۱۵]. در این بخش به معرفی کوتاهی از این ویژگی های مهم میکرو و نانو رشته ها پرداخته شده است.

۱.۲.۱ تمرکز اپتیکی قوی

بدلیل قطر کوچک میکرو و نانو رشته ها، نور می تواند در منطقه بسیار کوچکی درطول بلندی از افزاره محبوس(و یا متمرکز) شود و این حبس شدن امکان مشاهده برهمکنش های غیرخطی را در آنها فراهم می کند، مانند تولید سوپر کانتینیوم در سطوح توان نسبتا کم[۱۶، ۱۷].

۲.۲.۱ میدان های نزدیک سطحی قوی

بخش قابل ملاحظه ای از توان می تواند در خارج مرزهای فیزیکی نانورشته ها به صورت میدان های نزدیک سطحی انتشار پیدا کند[۱۸]. از این خاصیت می توان در بکارگیری بر هم کنش این میدان نزدیک به سطح نانو رشته و مواد دیگری که در مجاورت سطح نانو رشته قرار دارند، استفاده

---

[1] large evanescent fields

[2] tight optical confinement

[3] great configurability

[4] low-loss connection

کرد. در نتیجه می توان از این خاصیت برای هدایت اتم ها در افزاره های MEM[1] [۱۹]، ساخت سنسورها [2][۲۰، ۲۱]و تشدید کننده هایی با فاکتور کیفیت بالا [3] [۲۲، ۲۳]و نانو جفتگرهای دی الکتریک [4]بهره برد.

۳.۲.۱ انعطاف پذیری بالا

یکنواختی زیاد میکرو ونانو رشته ها نه تنها افت اپتیکی کم را در موجبرهای میکرو و نانو رشته ای فراهم می کند، بلکه، باعث استحکام مکانیکی بالایی در آنها می شود. در نتیجه این رشته ها انعطاف پذیری قابل توجه ای را از خود نشان می دهند. به همین دلیل، می توان ازآنها برای ساخت و تولید افزاره های اپتیکی با هندسه های پیچیده استفاده کرد. از جمله این افزاره های کوچک با شکل و هندسه پیچیده می توان از تشدید کننده های با شعاع خمیدگی از مرتبه چند میکرومتر با تلفات کم ناشی از خمیدگی نام برد[۲۴].

۴.۲.۱ اتصال کم تلفات

از آنجائیکه یکی از روش های معمول ساخت میکرو و نانورشته ها گرم کردن و کشیدن فیبرهای نوری می باشد، بنابراین ابعاد فیبر اولیه را در ورودی و خروجی حفظ می کنند و در نتیجه اتصال کم تلفات با دیگر فیبرهای اپتیکی و افزاره های رشته ای را امکان پذیر می کنند.

---

[1]Micro Electro Mechanical divines

[2]sensors

[3]high-Q resonators

[4]dielectric nano couplers

۵.۲.۱ اثرقطبش نور در انتشار آن در این نانورشته ها

میکرو و نانورشته های دی الکتریکی، ساختارهای نسبتا درازی هستند که تفاوت نسبتا زیاد نمار شکست ماده سازنده آنها، نسبت به فضای اطرافشان، ویژگی بارز آنها محسوب می شود[۲۵]. این تفاوت زیاد نمار شکست، خصوصیات جالبی در این رشته ها بوجود می آورد که در بخش (۱۰۳)مورد بررسی قرار گرفته می شود.

در رشته های اپتیکی با قطری کوچکتر از طول موج نور منتشر شونده در آنها، قطر کم میکرو ونانو رشته ها و تفاوت نمار شکست بین ماده سازنده آنها و محیط اطرافشان، توزیع شدت میدان مد اصلی و مولفه های آن، نسبت به فیبرهای هدایت ضعیف [۱]، که تفاوت نمار شکست هسته و پوشش درآنها کم است، را متفاوت می کند.

۳.۱ کاربردهای این میکرو و نانورشته ها در ساختن افزاره های میکرو و نانو اپتیکی و فو تونیکی

تاکنون افزاره های گوناگون با استفاده از میکرو و نانورشته ها ساخته شده اند، که اساس کار آنها بر پایه ویژگی های رشته های میکرو و نانو متری است که در بخش قبل توضیح داده شد. در این بخش به معرفی چند افزاره ساخته شده از میکرو و نانو رشته ها پرداخته شده است.

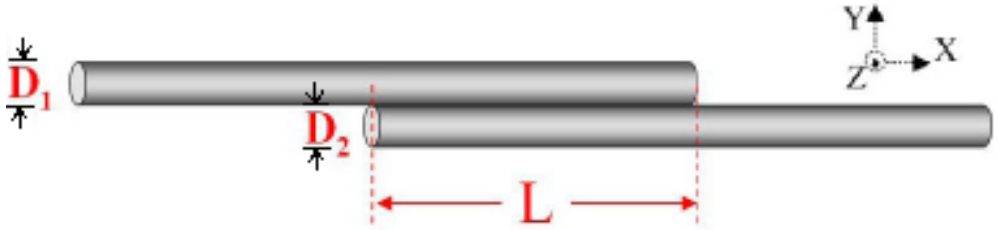
۱.۳.۱ جفتگرهای نانو رشته ای (ویا نانو جفتگرهای) دی الکتریک

یکی از ساده ترین افزاره های اپتیکی که با استفاده از نانورشته ها ساخته شده است، نانو جفتگرهای اپتیکی[۲۶][۲] هستند. بخش بزرگ میدان های خارج نانورشته ها به سادگی امکان ساخت یک نانو جفتگر اپتیکی با قرار دادن دو نانورشته بصورت پهلو به پهلوی هم را فراهم می کند. با قرار

[1] weakly guiding fibers

[2] optical nano couplers

دادن دو نانو رشته با قطر و جنس دلخواه می توان نانو جفتگرهای مختلف را برای کاربردهای مختلف اپتیکی و فو تونیکی طراحی کرد. شکل(۵۰۱) نمای الگواری از قرارگیری دو نانو رشته، به صورت پهلو به پهلوی هم را نشان می دهد. در این شکل دیده می شود که تنها با قرار دادن دو نانو رشته در کنار هم می توان یک نانو جفتگر ساخت، که نور ورودی به یکی از نانو رشته ها به دیگری انتقال می یابد.



شکل ۵.۱: نمای الگو واری از قرارگیری دو نانو رشته با طول محدود به صورت پهلو به پهلوی هم که یک جفتگر اپتیکی را تشکیل می دهند.

جفت شدگی دو نانو رشته بدلیل تفاوت زیاد نمار شکست آنها با محیط اطرافشان، با جفت شدگی فیبرهای نوری متداول، که از نوع جفت شدگی ضعیف می باشد، متفاوت می باشند. بدلیل برهمکنش های میدان نزدیک به سطح قوی، تبادل نور در این نانو رشته ها می تواند در طول جفت شدگی کوچک، بر خلاف جفتگرهای متداول ساخته شده از فیبرهای نوری معمولی، صورت پذیرد. بنابراین می توان جفتگرهایی در مقیاس میکرو و نانو متر با توان جفت شدگی بالا و طول جفت شدگی کوچک،L، ساخت.

نانو جفتگرها برای ساخت در همروی (ویاتداخل)سنج ها [1]در مقیاس میکرو و نانو متر، حسگرهای محیطی، تشدیدگرها و فیلترهای طول موجی استفاده می شوند. در نتیجه بررسی این نمونه از نانو جفتگرها می تواند در ساخت افزاره های اپتیکی و فوتونیکی در مقیاس نانو متری اهمیت زیادی داشته باشد، که در این پایان نامه، به بررسی این نانو جفتگرهای اپتیکی پرداخته شده است.

[1] interferometers