۱۳۷۸ /۶/ ۸

دانشگاه تهران

دانشکده علوم – گروه فیزیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

موضوع:

«طراحی و ساخت احساسگرهای فیبر نوری برای اندازه‌گیری جابجایی»

نگارش:

فرزاد وزمانی

3905,2

استاد راهنما:

دکتر حسین گل‌نبی

(دانشیار دانشگاه صنعتی شریف)

تابستان ۱۳۷۸

۲۶۶۹۱

« بسمه تعالی »

اداره تحصیلات تکمیلی دانشگاه

احتراماً باطلاع می‌رساند که جلسه دفاع از پایان‌نامه **دوره کارشناسی ارشد** ~~خانم~~ آقای فرزاد وزمانی

تحت عنوان :

طراحی‌وساخت‌احساسگرهای‌رشته‌ای‌پتیکی‌برای‌اندازه‌گیری‌کمیات‌فیزیکی

در تاریخ ۷۸/۴/۱۹ در محل دانشکده علوم دانشگاه تهران برگزار گردید.

هیأت داوران براساس کیفیت پایان‌نامه، استماع دفاعیه و نحوهٔ پاسخ به سوالات، پایان‌نامه ایشان را برای دریافت درجه **کارشناسی ارشد** در رشته فیزیک معادل با ع واحد با نمرهٔ هجده (۱۸/۰)

بادرجهٔ مورد تأیید قرار دارد.

هیأت داوران

سمت	نام و نام خانوادگی	مرتبهٔ دانشگاهی - دانشگاه	امضاء
۱- استاد راهنما	دکترحسین‌گل‌نبی	استادیار- دانشگاه‌صنعتی‌شریف	
۲- استاد مشاور	دکترمحمدتقی‌توسلی	دانشیار- دانشگاه‌تهران	
۳- استاد ناظر	دکترفرامرزاسماعیلی‌سراجی		
۴- استاد مدعو	دکترعطاء...کوهیان	دانشیار - دانشگاه‌تهران	
۵- نماینده تحصیلات تکمیلی گروه	دکترعزت‌ا...ارضی	استادیار - دانشگاه‌تهران	

سرپرست تحصیلات تکمیلی گروه — مدیر گروه — سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

دکترهوشنگ‌روحانی‌نژاد — دکترهوشنگ‌روحانی‌نژاد — دکتررسول‌خروی

۲۶۶۹۱

تقدیم به خانواده ام

وبخصوص

مادرم

قدردانی

درابتدا لازم میدانم از زحمات فراوان و راهنماییهای بیدریغ جناب آقای دکترگل نبی استاد راهنما ونیزتوصیه های ارزشمندجناب آقای دکترتوسلی استاد مشاورپایان نامه سپاسگزاری نمایم.ازکارکنان کارگاه آب وانرژی دانشگاه صنعتی شریف وبخصوص آقای علیزاده نیز که درتهیه نمونه عملی مرا یاری دادندکمال تشکررادارم.

چکیده

دراین پایان نامه سه احساسگررشته اپتیکی(فیبرنوری)ساخته شده اندکه بکمک آنهامیتوان کمیتهای فیزیکی مانند جا بجایی های کوچک را اندازه گیری نمود . این احساسگر ها عبارتند از: احساسگر جابجایی با استفاده ازعدسی وتک رشته یا دو رشته و احساسگرجابجایی بااستفاده ازعدسی وسطح بازتاباننده . روش کار بدین ترتیب است که نور دیودنورگسیل ، ابتداوارد یک رشته اپتیکی شده و خروجی آن توسط یک عدسی (یا عدسی و سطح بازتاباننده پشت آن) برروی رشته(ها)ی دریافت کننده کانونی می گردد . نور دریا فت شده سپس بوسیله یک آشکارساز نوری (فتودیود PIN) ویک ولتمتر رقومی اندازه گیری می شود. درعمل با تغییرمکان عدسی میزان نور دریا فت شده تغییرمی-نماید . با استفاده از تغییرات ایجاد شده در سیگنال خروجی ، می توان جابجایی را با دقت با لایی اندازه گیری کرد. برای احساسگر های یاد شده، بازه دینامیکی بدست آمده با استفاده ازرشته های ۴۵۰/۱۰۰۰ (غلاف/مغزی) میکرونی حدود ۶۰۰μm است. اندازه گیریهای مربوط به هر احساسگر چندین مرتبه تکرار شده و قابلیت تکرار خوبی را نشان می دهند. حساسیت احسا سگر های فوق بترتیب ۰/۵ ، ۰/۵۶ و ۲/۵۶ mV/μm می باشدکه بدون استفاده ازآمپلی فایر حساسیت های بالایی هستند. حساسیت و بازه دینامیکی این احساسگرها از احساسگرهای جابجایی رشته (که درمتن به آنها اشاره شده)بیشترمی باشد. همینطور دقت این احساسگرها از احساسگر جابجایی افقی عدسی بیشتر است اما بازه دینامیکی کمتری نسبت به احساسگریاد شده دارند. بکمک این وسایل اندازه-گیری جابجایی تا ۲μm براحتی امکانپذیراست.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

مقدمه ۱

فصل اول : اساس کار و ساختمان احساسگرهای رشته‌اپتیکی (فیبر نوری)

۱-۱- رشته اپتیکی ۴

۱-۲- احساسگرهای رشته‌اپتیکی ۶

۱-۲-۱- مدولاسیون شدت (یادامنه) ۹

۱-۲-۲- مدولاسیون فاز ۹

۱-۲-۳- مدولاسیون قطبیدگی ۱۱

۱-۳- دسته‌بندی احساسگرهای رشته اپتیکی ۱۳

۱-۳-۱- احساسگرهای رشته‌اپتیکی عارضی (Extrinsic) ۱۳

۱-۳-۲- احساسگرهای رشته‌اپتیکی موج‌میرا (Evanescent) ۲۳

۱-۳-۳- احساسگرهای رشته‌اپتیکی ذاتی (Intrinsic) ۲۵

۱-۴- چشمه‌های نوری ۳۰

۱-۵- آشکارسازهای نوری ۳۴

فصل دوم : کوپلاژ نور در احساسگرهای مدولاسیون شدت

۲-۱- چگالی پرتویک چشمه لامبرتین در فضای فاز ۳۹

۲-۲- کوپلاژنور از LED به رشته چندمدی ۴۳

۲-۳- کوپلاژ نور بین رشته‌های چند مدی ۴۶

۲-۳-۱- اتلاف‌های ذاتی ۴۶

عنوان **صفحه**

۲-۳-۲- اتلاف‌های غیرذاتی ۴۸

فصل سوم : بررسی احساسگرهای طراحی شده

۳-۱- احساسگرهای تراگسیلی ۵۹

۳-۱-۱- احساسگر جابجایی با استفاده از عدسی و تک‌رشته ۵۹

۳-۱-۲- احساسگر جابجایی با استفاده از عدسی و دو رشته ۷۷

۳-۲- احساسگر بازتابشی ۸۳

فصل چهارم : نتایج آزمایش احساسگرهای طراحی شده

نتیجه‌گیری ۱۰۲

واژه‌نامه ۱۰۵

مراجع ۱۰۷

مقدمه

ایجاد ارتباط با استفاده از موجبرهای دی‌الکتریکی که از استوانه‌ای شیشه‌ای یا پلاستیکی ساخته می‌شوند تقریبا از سال ۱۸۸۰ میلادی آغاز شد اما سیستم مخابرات نوری بصورت فعلی با اختراع لیزر حالت جامد در سال ۱۹۵۸ (بعنوان فرستنده) ابداع شد. در این سال‌ها روش‌های لیزری مورد بررسی قرارگرفت و نتایج رضایتبخش بدست آمد. با ظهور منابع نوری نیمرسانا مانند دیودهای لیزری و نوری و آشکار سازهایی همچون فتودیودها و فتوترانزیستورها و با پیشرفت تکنولوژی ساخت و اتصال رشته‌های‌اپتیکی در دههٔ ۱۹۷۰ مخابرات نوری بتدریج توسعه و تکامل بیشتری یافت و راه خود را در جهان صنعت بازکرد. بطوری که تا سال ۱۹۸۰ اغلب کشورهای اروپایی، ژاپن و آمریکا سیستم مخابرات نوری را در شبکه مخابراتی خود گنجاندند. قبل از سیستم ارتباط رشته‌اپتیکی، کابل‌های کواکسیال و سیستم‌های رادیویی مایکروویو (که هم اکنون نیز هست) در حد وسیعی مورد استفاده بود اما دلیل تغییر سیستم به رشته‌اپتیکی، ظرفیت انتقال بسیار بالای این سیستم و در نتیجه کاهش قیمت تمام شده بازای هر کانال ارتباطی بود [18,2,1].

امروزه تکنولوژی کاربردی رشته‌اپتیکی، در دو راستا بطور همگام پیش می‌رود : مخابرات رشته‌اپتیکی، و احساسگرهای رشته‌اپتیکی. تکنولوژی احساسگرهای رشته‌اپتیکی در سطح جهانی یک تکنولوژی بسیار جوان است و کار بر روی این احساسگرها از ۱۹۸۰ میلادی آغاز شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که استفاده صنعتی از این احساسگرها در اوایل بعلت گران بودن اجزاء و قطعات مورد نیاز، کند بوده اما در سالهای اخیر با بالارفتن کیفیت تولیدات و پایین آمدن قیمت قطعات، ورود این احساسگرها به بازار تجارتی سیر صعودی داشته است. احساسگرهای رشته‌اپتیکی بعلت دارا بودن مزایایی همچون ایمنی در برابر ولتاژهای بالا، باند عبوری گسترده، ایمنی در مقابل تداخل الکترومغناطیسی (EMI) و تداخل امواج رادیویی (RFI)، عدم تابش سیگنال اطلاعاتی به خارج رشته‌اپتیکی وزن و حجم کم، انعطاف‌پذیری، مقاومت در برابر مواد شیمیایی و عوامل مختلف محیطی و پایین‌بودن قیمت قطعات بکار رفته در آنها بر احساسگرهای متداول برتری دارند. بعلاوه در برخی موارد مانند محیط‌های با رادیواکتیویته بالا، محیط‌های دارای جریان و ولتاژ زیاد و مکانهایی که احتمال

انفجار وجود دارد فقط از این نوع احساسگر می‌توان استفاده کرد. چنین مزایایی این امکان را فراهم کرده است که از احساسگرهای رشته‌اپتیکی در کاربردهای مختلف تحقیقاتی، صنعتی و پزشکی مانند اندازه‌گیری شدت نور، جابجایی، دما، فشار، میدان الکتریکی و مغناطیسی، ارتعاش، میزان تابش، زاویه چرخش، شدت صوت، سرعت سنجی شاره‌ها، اندازه‌گیری ترکیبات خون، آشکارسازی مواد شیمیایی و بسیاری کاربردهای دیگری استفاده بعمل آید. در چند سال اخیر انواع و اقسام احساسگرهای رشته‌اپتیکی طراحی شده‌اند که بعضی به مرحله تجارتی رسیده‌اند اما بسیاری دیگر هم هنوز در مرحله تحقیقاتی قرار دارند. برای ساخت یک احساسگر رشته‌اپتیکی تکنیک‌های مختلفی ممکن است موجود باشد. یک طراح احساسگر برای انتخاب یک نوع تکنیک مناسب باید معیارهای زیر را در نظر داشته باشد :

- طراحی باید طوری باشد که نیازهای کاربر را در زمینه دقت، حساسیت و تکرارپذیری برآورده سازد.

- اثرات مزاحم تداخلی به حداقل رسانده شود بطوری که اندازه‌گیری بسهولت انجام گیرد.

- شرایط محیطی نباید سبب ایجاد مشکل برای رشته‌های‌اپتیکی و اجزای احساسگر شود.

- اجزای وابسته به رشته‌اپتیکی (مانند جفتگرها) باید از لحاظ استاندارد بودن و نیز سیگنال‌های خروجی (که بعداً پردازش می‌شوند) با کل سیستم سازگار باشند.

- خصوصیات بسته‌بندی و شکل احساسگر باید معین و مطابق نیاز باشد. بطور مطلوب طراحی محفظه باید طوری باشد که قابلیت پاسخ به متغیر مورد سنجش را افزایش داده و قابلیت پاسخ به اثرات مزاحم جانبی را کاهش دهد.

- قیمت تمام شده باید متناسب با کاربرد مورد نظر باشد[3]

با مدنظر قرار دادن موارد فوق، در این پایان‌نامه سعی شده است یک طراحی مناسب برای احساسگر مدولاسیون شدت بوسیله عدسی، ارایه شود. در فصل اول کلیاتی درباره رشته‌های‌نوری، آشکار سازها و منابع نوری آمده است و سازوکارهای مختلف مدولاسیون به همراه مثال‌هایی شرح داده

شده است. فصل دوم به احساسگرهای مدولاسیون شدت و محاسبه میزان کوپلاژ نور در آنها اختصاص یافته و فصل سوم به چگونگی طراحی و ساخت احساسگرها می‌پردازد. در فصل چهارم هم نتایج آزمایشهای اندازه‌گیری جابجایی بوسیله احساسگرهای طراحی شده ذکر شده و مشخصات نمودارها مانند حساسیت، خطی بودن، بازه دینامیکی و غیره مورد بحث قرار گرفته است.

رسم نمودارهای این پایان‌نامه بکمک نرم‌افزارهای Harvard graphics و Jandel scientific صورت گرفته است. در انتهای مبحث نیز نتیجه‌گیری کلی بعمل آمده است.

فصل اول:

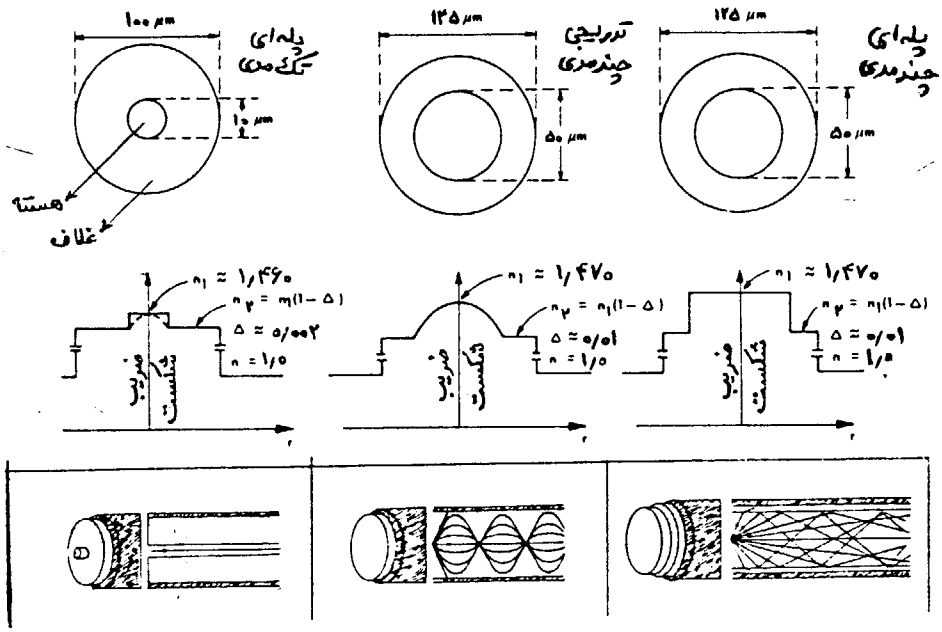
اساس کاروساختمان احساسگرهای

رشته اپتیکی

۱-۱- رشته‌اپتیکی

رشته‌اپتیکی که براساس بازتابش کلی داخلی کار می‌کند تشکیل شده از یک قسمت داخلی به نام مغزی (Core) با ضریب شکست n_1 و یک قسمت خارجی به نام غلاف (Cladding) با ضریب شکست n_2 بطوری که $n_1 > n_2$.

رشته‌های‌اپتیکی به دو دسته ضریب شکست تدریجی (GRADED INDEX) و ضریب شکست پله‌ای (STEP INDEX) تقسیم می‌شوند. شکل (۱.۱) ساختار و نیمرخ ضریب شکست انواع رشته‌ها را نشان می‌دهد. در جدول (۱.۱) نیز برخی از مشخصات آنها آمده است[1]. باید توجه داشت بسته به شرایط محیطی که رشته‌اپتیکی در آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. طراحیهای ویژه‌ای لازم است روی آن انجام گیرد. مثلاً برای کاربرد در حرارت‌های بالا مانند کنترل احتراق و کموتاتور اتوماتیک (برگرداننده جهت جریان برق) و نظارت بر تزریق مواد (Injection) رشته‌های‌اپتیکی دارای پوشش ویژهٔ فلزی یا پلیمری مورد نیاز است؛ یا در محیط‌های شیمیایی خورنده لزوماً باید از پوشش‌های



شکل ۱.۱. ساختار و نیمرخ ضریب شکست انواع رشته‌های‌اپتیکی [1].

جدول ۱.۱. برخی مشخصات رشته‌های اپتیکی [1].

	پله‌ای چندمدی	تدریجی چندمدی	پله‌ای تک‌مدی
چشمهٔ نور	لیزر یا LED	لیزر یا LED	نیازمند لیزر
اتصالات	مشکل اما انجام‌پذیر	مشکل اما انجام‌پذیر	بدلیل کوچک بودن مغزی بسیار مشکل است
نمونه‌ای از کاربرد	ارتباط اطلاعاتی	خطوط تلفن	سیستم کابل زیردریایی
قیمت	ارزانترازبقیه	گرانترازبقیه	متوسط

پلاستیکی ویژه استفاده کرد. در موارد دیگری همچون استفاده در داخل چاههای زیرزمینی فقط از رشته‌هایی می‌توان استفاده کرد که در برابر دمای زیاد، ساییدگی و خوردگی مقاوم باشند. آلودن رشته‌اپتیکی با فلزات کمیاب می‌تواند موجب افزایش چرخش فاراده (در اندازه‌گیری میدان مغناطیسی) گردد. در آشکارسازی پرتوایکس و گاما نیز از رشته‌های با پوشش پلیمری ویژه که نقش سوسوزن را ایفا می‌کند استفاده می‌شود. رشته‌های حافظ قطبیدگی نیز دسته دیگری از رشته‌های اپتیکی هستند که بصورت ویژه ساخته می‌شوند. در این نوع رشته‌ها با گنجاندن نواحی دارای فشار بالا در داخل رشته‌اپتیکی یا با ساختن مغزی و غلاف بصورت بیضوی، دو شکستی رشته را عمداً نامتقارن می‌کنند [4].

اگر از شکنندگی رشته‌های اپتیکی صرفنظر کنیم مزایای آنها را می‌توان بصورت زیر خلاصه کرد:

- **میزان خیلی بالای انتقال اطلاعات دیجیتالی:** رشته‌اپتیکی برای انتقال سیگنال‌های دیجیتال بسیار مناسب است و می‌تواند اطلاعات را با آهنگ چند Mbit/s تا چندین Gbit/s انتقال دهد.

- **باریک بودن کابل‌ها:** قطر کابل‌های رشته‌اپتیکی در حدود میلیمتر بوده و وزن آن نیز بسیار کم است.

- **ایمنی در برابر تداخل و نوفه الکترو مغناطیسی:** هر رشته‌اپتیکی موجبری بسته است و هیچگونه

تـداخـل الکـترومغناطیسی در آن ایـجاد نـمی‌شود. رعـد و بـرق، امـواج رادیـویی و ضـربه‌های الکترومغناطیسی حاصل از سلاح‌های هسته‌ای تاثیری بر آن ندارد.

- **اعتبار و امنیت بالا :** استخراج اطلاعات آن بوسیله القا یا اتصال ساده غیرممکن است. برای این منظور باید نور را از داخل رشته بیرون کشید اما انجام این کار منجر به ایجاد سیگنال در آشکارساز مقصد شده و از این رو مشخص می‌شود که اطلاعات در محل معینی از رشته خارج شده است.

- **امنیت کامل :** هیچگونه خطر برق‌گرفتگی، اتصال کوتاه یا نشت برای رشته‌های‌اپتیکی وجـود ندارد.

- **قیمت پایین :** به نسبت کاربردهای وسیع آن قیمتش پایین است.

انعطاف‌پذیری : این امکان را می‌دهد که در مسیرهای مارپیچی کارگذاری شود و یا درکاربردهایی همچون ژیروسکوپ بصورت کلاف درآید.

- **عدم تاثیر مواد شیمیایی :** رشته‌های‌اپتیکی در برابر اغلب مواد شیمیایی مقاومند [4,3].

در اینجا لازم است به دو نکته ایمنی در هنگام کار با رشته‌های‌اپتیکی و استفاده از توان‌های نوری بالا اشاره کنیم : اول آسیب دیدن چشم‌ها در اثر چگالی بالای نورگسیل شده توسط چشمه نور (لیزر) و در نهایت توسط رشته‌اپتیکی که می‌تواند شبکیه چشم را برای همیشه از بین ببرد. برای جلوگیری از این مصدومیت باید از عینک‌های محافظ فروسرخ استفاده کرد. دوم انفجار یا آتش‌سوزی در اثر جذب تابش توسط ذرات معلق در هواست. یک شکستگی کوچک در رشته‌اپتیکی موجب ایجاد یک پـرتو واگـرا می‌شود و ذره‌ای که ابعادش در حد قطر هسته رشته‌اپتیکی باشد می‌تواند این تابش را جذب کند. مثلاً یک ذره ۵۰ میکرونی که در مسیر یک باریکه ۶mw قرار دارد می‌تواند دی‌اتیل‌اتر یا دی‌سولفیدکربن را مشتعل سازد. بنابراین عبور دادن رشته‌های حامل توان‌های نوری بالا از محیط‌های بالقوه انفجاری باید با احتیاط صورت گیرد [3].

۱-۲- احساسگرهای رشته‌اپتیکی

بطورکلی احساسگر وسیله‌ای است که دارای یک سنجه حساس بوده و این سنجه در اثر اعمال

یک (یا چند) پارامتر فیزیکی یا شیمیایی به طریقی تغییر می‌نماید و این تغییر را به یک سیگنال قابل اندازه‌گیری تبدیل می‌کند تغییر در سیگنال خروجی یک احساسگر تابعی از پارامترهای ورودی است.

در احساسگرهای رشته‌اپتیکی به دو صورت از رشته‌های اپتیکی استفاده می‌شود: صرفاً برای انتقال نور (حالت ناکنا passive) و یا بعنوان **مدولاتور** یعنی پارامتر موردنظر مستقیماً بر خود رشته تأثیر می‌گذارد (حالت کنا active). احساسگرهای رشته‌اپتیکی بطورکلی وسایل عایقی هستند و از این رو از تداخل الکترو مغناطیسی و پالس‌های الکترومغناطیسی مصون می‌باشند و از آنها می‌توان در محیطهای خطرناک و انفجاری که سایر احساسگرهای معمولی کاربرد ندارند استفاده کرد. احساسگرهای رشته‌اپتیکی دارای مزایای زیادی می‌باشند که در مقدمه به آنها اشاره شده است. یکی از ویژگیهای برجسته آنها این است که اندازه‌گیری را می‌توان بدون تماس انجام داد و این امر آنها را برای اندازه‌گیری از راه دور مناسب می‌سازد[4]. احساسگرهای رشته‌اپتیکی دارای معایبی نیز هستند از جمله : شکستنی بودن که باید بسته‌بندی احساسگر محکم باشد؛ اندازه کوچک اجزای اپتیکی بکار رفته در آنها که کار همترازی و تنظیم را مشکل می‌سازد و حساسیت به چند پارامتر مختلف مانند دما، کشش و فشار بطور همزمان(مثلاً در هیدروفون طول رشته ممکن است هم در اثر فشار صوتی تغییرکند و هم در اثر دما). حل مشکل آخری یعنی جداسازی پارامترهای مختلف نیازمند روش‌هایی ویژه است که بر پیچیدگی وسیله می‌افزاید. به هر حال انبوه مقالات ارایه شده در مورد احساسگرهای رشته‌اپتیکی گواهی بر کارآیی و گسترش روزافزون این وسایل می‌باشد.

یک احساسگر رشته‌اپتیکی تشکیل شده است از چشمه نور، یک فصل مشترک اپتیکی، یک یا چند رشته‌اپتیکی، مدولاتور نوری، آشکارساز و پردازشگر سیگنال. اجزای کلی احساسگر در شکل (۲.۱) نشان داده شده است. چشمه نور می‌تواند پهن باند (مثلاً یک لامپ تابان)، باریک باند (مثل LED و لیزر چند مدی) و یا تک فرکانس (مثل لیزر تک مدی) باشد. همینطور رشته‌های‌اپتیکی و سایر اجزای اپتیکی می‌توانند تک مدی یا چند مدی باشند که انتخاب آن بستگی به نوع احساسگر دارد. مسئله کوپلاژ نور چشمه به رشته‌اپتیکی هم به این بستگی دارد که رشته تک مدی بکار می‌رود یا رشته چند مدی. در حالت استفاده از رشته چند مدی جفت شدن سربه سر چشمه و رشته‌اپتیکی با استفاده از یک