

به نام ایزد دانا

۴۳۶۱۷



دانشگاه تهران

دانشکده علوم - گروه فیزیک

عنوان :

طراحی فیبرهای نوری چند لایه Z-DSF و بررسی مشخصه های انتشار آنها
جهت استفاده در شبکه مخابرات نوری جدید

۱۳۸۱ / ۱۱ / ۲۰

نگارنده :

بهزاد زرگری

وزارت اطلاعات
تیم مخابرات

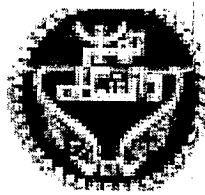
استاد راهنما :

دکتر عزت الله ارضی

۴۵۶۱۷

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک کاربردی

شهریور ماه ۱۳۸۱



اداره تحصیلات تکمیلی دانشگاه

احتراماً باطلاع می‌رساند که جلسه دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد آقای بهزاد زرگری

تحت عنوان: "طراحی فیبرهای نوری چند لایه Z_DSF و بررسی مشخصه های انتشار آنها جهت استفاده در شبکه مخابرات نوری جدید" در تاریخ ۲۳/۳/۱۳۸۵ محل دانشکده علوم دانشگاه تهران برگزار گردید.

هیات داوران براساس کیفیت پایان نامه، استماع دفاعیه و نحوه پاسخ به سوالات، پایانه نامه ایشان را برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک معادل با شش واحد با نمره ۱۸/۵ با درجه **بسیار خوب** مورد تایید قرار دارد.

هیات داوران

امضاء	مرتبه دانشگاهی - دانشگاه	نام و نام خانوادگی	سمت
	دانشیار - دانشگاه تهران	آقای دکتر عزت اله ارضی	۴. استاد راهنما
	استادیار - شرکت کابلهای مخابراتی شهید قندی	آقای دکتر فرامرز اسماعیلی سراجی	۵. استاد داور خارجی
	دانشیار - دانشگاه تهران	آقای دکتر محمد تقی توسلی	۶. استاد داور داخلی

دکتر حسن ابراهیم واده

رئیس دانشکده علوم

دکتر عزت اله ارضی

مدیر گروه آموزشی فیزیک

دکتر محمد تقی توسلی

سرپرست تحصیلات تکمیلی فیزیک

از استاد گرانقدر آقای دکتر عزت الله ارضی که با کمکهای
خود مرا در به پایان رسانیدن این پایان نامه یاری نمودند،
صمیمانه سپاسگزاری می نمایم.

چکیده

در این پایان نامه نحوه تجزیه و تحلیل یک موج بر عایق استوانه ای شکل با ضریب شکست پله ای ارائه شده است. این فرمول بندی برای فیبرهای نوری پنج لایه صادق است ولی در حالت حدی برای فیبرهای با لایه های کم تر نیز قابل استفاده است. مشخصه های انتشار مانند سطح موثر، قطر میدان مدی (MFD)، طول موج قطع، پاشندگی و اتلاف ناشی از اتصال و خمش ارائه شده است. همچنین نشان داده شده که سطح موثر بیشتر تنها به ازای مقدار اتلاف بیشتر (و در نتیجه قطر میدان مدی بزرگتر) بدست می آید. بنابراین با استفاده از تعریف کمیتی بر حسب سطح موثر و قطر میدان مدی به نام ضریب کیفیت، امکان مقایسه فیبرها مقدور گردیده است.

فیبرهای با پاشندگی تغییر یافته (Z-DSF) با ضریب کیفیت 1.09 تا 1.136 و با پاشندگی کم تر از $0.04 \text{ ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}$ طراحی و ارائه گردیده است. همچنین با استفاده از همین آرایه فیبرهای با پاشندگی هموار (DFF) نیز طراحی و ارائه شده است. این فیبرها در طول موج بین $1.48 \mu\text{m}$ تا $1.58 \mu\text{m}$ سطح موثری بین $75 \mu\text{m}^2$ تا $100 \mu\text{m}^2$ دارند. در حالی که در همین بازه از طول موج، مقدار پاشندگی کمتر از $0.8 \text{ ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}$ باقی می ماند.

برای اطمینان از امکان تولید این فیبرها، اثر تغییر غیر قابل اجتناب ضریب شکست و شعاع لایه های مختلف هنگام ساخت روی سطح موثر، پاشندگی و قطر میدان مدی بررسی و بدست داده شده است.

فهرست مطالب

1	فصل 1. مقدمه
3	فصل 2. روش کلی محاسبه مشخصه‌های انتشار فیبرنوری پله‌ای چند لایه
3	2.1 مواد سازنده فیبرنوری
4	2.2 تقریب هدایت ضعیف
10	2.3 مشخصه‌های انتشار
10	2.3.1 طول موج قطع
11	2.3.2 قطر میدان مدی
14	2.3.3 سطح مؤثر
15	2.3.4 ضریب کیفیت
17	فصل 3. پاشندگی و اتلاف
17	3.1 پاشندگی در فیبرهای چند مدی
17	3.2 پاشندگی در فیبرهای تک مدی
17	3.2.1 پاشندگی موج بر
18	3.2.2 پاشندگی ماده
18	3.2.3 پاشندگی ناشی از قطبیدگی
18	3.3 نحوه محاسبه پاشندگی کل
20	3.3.1 فیبرهای با پاشندگی تغییر یافته
20	3.3.2 فیبرهای با پاشندگی هموار
21	3.3.3 فیبرهای با پاشندگی جبرانی
21	3.4 اتلاف در فیبر
21	3.4.1 اتلاف ناشی از مواد سازنده فیبر
22	3.4.2 اتلاف فیزیکی
22	3.4.3 اتلاف ناشی از اتصال

23	3.4.4 اتلاف ناشی از خمش
26	فصل 4. نتایج عددی
26	4.1 مشخصات فیبرها
30	4.2 بررسی تغییر مشخصه‌های انتشار برحسب تغییر شعاع و ضریب شکست لایه‌ها
67	فصل 5. نتیجه‌گیری

فهرست شکلها:

32	شکل 4.1 تابع موج فیبر a
33	شکل 4.2 تابع موج فیبر b
34	شکل 4.3 تابع موج فیبر c
35	شکل 4.4 تابع موج فیبر d
36	شکل 4.5 تابع موج فیبر e
37	شکل 4.6 تغییرات پاشندگی فیبر a برحسب طول موج
38	شکل 4.7 تغییرات پاشندگی فیبر b برحسب طول موج
39	شکل 4.8 تغییرات پاشندگی فیبر c برحسب طول موج
40	شکل 4.9 تغییرات پاشندگی فیبر d برحسب طول موج
41	شکل 4.10 تغییرات پاشندگی فیبر e برحسب طول موج
	شکل 4.11 تغییرات اتلاف ناشی از اتصال فیبرهای
42	a, b و c برحسب طول موج
	شکل 4.12 تغییرات اتلاف ناشی از اتصال فیبرهای d و e
43	برحسب طول موج
	شکل 4.13 تغییرات پاشندگی فیبر b برحسب طول موج
44	شعاع لایه اول $\pm 1\%$ تغییر کرده است
	شکل 4.14 تغییرات سطح مؤثر فیبر b برحسب طول موج
45	شعاع لایه اول $\pm 1\%$ تغییر کرده است

- شکل 4.15 تغییرات قطر میدان مدی فیبر b برحسب طول موج.
- 46 شعاع لایه اول $\pm 1\%$ تغییر کرده است
- شکل 4.16 تغییرات پاشندگی فیبر b برحسب طول موج.
- 47 شعاع لایه دوم $\pm 1\%$ تغییر کرده است
- شکل 4.17 تغییرات سطح مؤثر فیبر b برحسب طول موج.
- 48 شعاع لایه اول $\pm 1\%$ تغییر کرده است
- شکل 4.18 تغییرات قطر میدان مدی فیبر b برحسب طول موج.
- 49 شعاع لایه اول $\pm 1\%$ تغییر کرده است
- شکل 4.19 تغییرات پاشندگی فیبر b برحسب طول موج.
- 50 ضریب شکست لایه دوم $\pm 10^{-2}\%$ تغییر کرده است
- شکل 4.20 تغییرات سطح مؤثر فیبر b برحسب طول موج.
- 51 ضریب شکست لایه دوم $\pm 10^{-2}\%$ تغییر کرده است
- شکل 4.21 تغییرات قطر میدان مدی فیبر b برحسب طول موج.
- 52 ضریب شکست لایه دوم $\pm 10^{-2}\%$ تغییر کرده است
- شکل 4.22 تغییرات پاشندگی فیبر b برحسب طول موج.
- 53 ضریب شکست لایه سوم $\pm 10^{-2}\%$ تغییر کرده است
- شکل 4.23 تغییرات سطح مؤثر فیبر b برحسب طول موج.
- 54 ضریب شکست لایه سوم $\pm 10^{-2}\%$ تغییر کرده است
- شکل 4.24 تغییرات قطر میدان مدی فیبر b برحسب طول موج.
- 55 ضریب شکست لایه دوم $\pm 10^{-2}\%$ تغییر کرده است
- شکل 4.25 تغییرات پاشندگی فیبر d برحسب طول موج.
- 56 شعاع لایه اول $\pm 1\%$ تغییر کرده است
- شکل 4.26 تغییرات سطح مؤثر فیبر d برحسب طول موج.
- 57 شعاع لایه اول $\pm 1\%$ تغییر کرده است
- شکل 4.27 تغییرات پاشندگی فیبر d برحسب طول موج.

58 شعاع لایه اول $\pm 1\%$ تغییر کرده است

شکل 4.28 تغییرات پاشندگی فیبر d برحسب طول موج.

59 شعاع لایه دوم $\pm 1\%$ تغییر کرده است

شکل 4.30 تغییرات قطر میدان مدی فیبر d برحسب طول موج.

60 شعاع لایه دوم $\pm 1\%$ تغییر کرده است

فهرست جدولها:

12 جدول 2.1 مقایسه مقادیر $\Psi(r), \Psi_c(r)$ به ازای مقادیر مختلف r

جدول 2.2 مقایسه مقادیر $\Psi(r), \Psi_c(r)$ برای فیبرنوری متناظر

13 با $V=2.376$

جدول 2.3 مقایسه مشخصه‌های فیبر 1 متناظر با $V=5.8$

16 که از دو طریق محاسبه شده‌اند

جدول 2.4 مقایسه مشخصه‌های فیبر 2 متناظر با $V=6.0928$

16 که از دو طریق محاسبه شده‌اند

28 جدول 4.1 مواد سازنده و شعاع لایه‌های مختلف فیبرهای a تا e

29 جدول 4.2 مشخصه‌های انتشار فیبرهای a تا e

جدول 4.3 طول موج قطع متناظر با مدهای 0 تا 10

30 برای فیبرهای a تا e

31 جدول 4.4 مقدار اتلاف ناشی از خمش برای فیبر d و e

31 جدول 4.5 مقدار اتلاف ناشی از خمش برای فیبر b

68 جدول A.1 مواد سازنده فیبرهای نوری

69 جدول A.2 ضرائب Sellmier برای انواع مواد سازنده فیبر

پیوست‌ها:

- 68 پیوست A. مواد سازنده فیبرنوری و ضرائب Sellmier مربوط به آن
- 70 پیوست B بدست آوردن معادله موج اسکالر
- پیوست C شکل ساده شده معادله مشخصه و محاسبه طول موج
- 73 قطع متناظر با مدهای مختلف به کمک آن
- 82 پیوست D نحوه محاسبه مقدار پاشندگی
- 86 مراجع

پیوست‌ها:

- 68 پیوست A. مواد سازنده فیبرنوری و ضرائب Sellmier مربوط به آن
- 70 پیوست B بدست آوردن معادله موج اسکالر
- پیوست C شکل ساده شده معادله مشخصه و محاسبه طول موج
- 73 قطع متناظر با مدهای مختلف به کمک آن
- 82 پیوست D نحوه محاسبه مقدار پاشندگی
- 86 مراجع

فصل 1 - مقدمه

فیبرنوری، موج بر عایقی است که به علت داشتن مزیت‌های متعدد نسبت به موج برهای هادی متداول، مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. مهم‌ترین برتری فیبر نوری نسبت به موج بر هادی اتلاف بسیار کم و امکان انتقال اطلاعات بسیار بیشتر است. مثلاً اتلاف یک موج بر هادی حدود 5 dB.km^{-1} است ولی در فیبر نوری این مقدار حدود 0.2 dB.km^{-1} است. به عبارت دیگر اتلاف انرژی در موج بر عایق، $\frac{1}{3}$ اتلاف انرژی در موج بر هادی است. از طرف دیگر فرکانس موج انتقالی توسط فیبر نوری حدود 10^{14} Hz است ولی این مقدار برای موج بر هادی 10^9 Hz است. به همین علت قدرت انتقال اطلاعات یک فیبر نوری 10^4 برابر یک موج بر هادی است. مسئله دیگری که باعث توجه هر چه بیشتر به فیبرهای نوری شد، ابداع تقویت‌کننده‌های اریبومی (EDFA) در سال 1987 است. قبل از این تاریخ، برای جبران اتلاف در فیبر نوری از تقویت‌کننده الکترونیکی استفاده می‌شد که بعلاوه تبدیل فرکانس اپتیکی به فرکانس ماکروویو در وروی و تبدیل مجدد آن در خروجی تولید نویز زیادی می‌شد. نظر به اینکه EDFA در فرکانس اپتیکی کار می‌کند، این مشکل حل شد. بعلاوه بهره این تقویت‌کننده حداقل حدود 40 dB است که این بسیار بیشتر از تقویت‌کننده‌های الکترونیکی است.

اما مهم‌ترین اشکال فیبر نوری است که به علت شدت زیاد موج اعمال شده و بستگی ضریب شکست مواد سازنده فیبر به این شدت، پدیده‌های غیر خطی اتفاق می‌افتند که عموماً نامطلوب هستند. بستگی ضریب شکست به شدت نور را میتوان به صورت $n = n_L + n_{NL}$ نمایش داد، که n_L ، n_{NL} به ترتیب قسمتهای خطی و غیرخطی ضریب شکست هستند. قسمت غیرخطی را میتوان بصورت $n_{NL} = \frac{N.P}{A_{eff}}$ نمایش داد که N بستگی به مواد سازنده فیبر دارد، P شدت موج اعمال شده داخل فیبر و A_{eff} سطح موثر¹ است [1]. بنابراین مشخص می‌شود که برای کاهش اثرات غیرخطی، باید سطح موثر هرچه بیشتر افزایش یابد. اما خواهیم دید که افزایش سطح موثر، سبب افزایش کمیتی به نام قطر میدان مدی² (MFD) می‌شود

¹ - Effective area

² - Mode field diameter

که این خود سبب افزایش میزان اتلاف می‌شود. بنابراین برای امکان مقایسه حالت‌های مختلف، از تعریف یک کمیت بدون بعد بنام ضریب کیفیت استفاده می‌کنیم. این کمیت بصورت $Q = \frac{A_{eff}}{d_0^2}$ تعریف می‌شود که در آن d_0 قطر میدان مدی است. با استفاده از مقایسه Q برای فیبرهای نوری مختلف، میتوان بهترین گزینه را انتخاب کرد.

کمیت مهم دیگر، پاشندگی است. این کمیت که ناشی از بستگی سرعت گروه به طول موج است، ظرفیت انتقال اطلاعات را محدود می‌کند. بنابراین لازم است که این کمیت هرچه ممکن است کمتر شود. به همین منظور تمامی فیبرها بگونه‌ای طراحی شده‌اند که برای جلوگیری از پاشندگی بین مدی، فیبرها تک مد باشند.

پاشندگی کل برای تمامی فیبرهای نوری طراحی شده کم‌تر از $0.06 \text{ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}$ است. در فصل دوم نحوه محاسبه این کمیتها در حالت کلی و برای یک فیبر نوری 5 لایه استوانه‌ای شکل ارائه شده. این فرمول‌بندی برای تمام فیبرهای نوری چند لایه با ضریب شکست پله‌ای صادق است. در ادامه، آرایه خاصی از ضریب شکست‌ها (که به آرایه W شکل معروف است) مورد بررسی قرار خواهد گرفت. همچنین از همین آرایه برای طراحی فیبرهایی استفاده خواهد شد که در آن برای گستره وسیعی از طول موجها مقدار پاشندگی قابل قبول ($1 \text{ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}$) است. خواهیم دید که محاسبه تمام کمیتها منوط به محاسبه میدان الکتریکی E داخل فیبر است. برای محاسبه میدان از تقریب هدایت ضعیف استفاده شده است [2]. از اعمال شرایط مرزی، مجموعه معادلات خطی همگنی حاصل می‌شوند که شرط داشتن جواب برای آنها، منجر به محاسبه ثابت انتشار، β ، می‌شود.

فصل سوم اختصاص به توصیف مسئله پاشندگی، انواع و نحوه محاسبه آن دارد برای محاسبه پاشندگی از تصحیح برداری ثابت انتشار استفاده شده [3]. در ضمن انواع مختلف اتلاف نیز بررسی شده است.

در فصل چهارم نیز نتایج عددی برای فیبرهای نوری مختلف ارائه شده است. برای استفاده از کمینه مقدار اتلاف، تمامی کمیت‌های مورد نظر در طول موج $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ محاسبه شده‌اند.

فصل 2- روش کلی محاسبه مشخصه‌های انتشار فیبر نوری پله‌ای چند لایه

در این فصل مشخصه‌های مهم انتشار مانند سطح موثر (A_{eff})، قطر میدان مدی MFD و ضریب کیفیت (Q) را تعریف و روش محاسبه آن را ارائه می‌دهیم. همچنین طول موج قطع را نیز محاسبه خواهیم کرد. این روش برای کلیه فیبرهای نوری پله‌ای پنج لایه و یا کم‌تر صادق است.

2-1 مواد سازنده فیبر نوری: تمامی موادی که در ساختن این فیبرها بکار رفته دارای درصد بسیار زیادی (حداقل 85٪) سیلیکا هستند و بقیه مواد سازنده، بصورت ناخالصی اضافه شده‌اند. این واقعیت سبب می‌شود که ضریب شکست مواد مختلف بسیار به هم نزدیک باشد که این امر نقش بسیار مهمی در سادگی محاسبات خواهد داشت. همچنین مواد سازنده فیبرها را خطی و همگن فرض می‌کنیم. از لحاظ ریاضی میتوان این دو شرایط را این گونه بیان کرد:

رابطه بین قطبیدگی P ، میدان الکتریکی E در حالت کلی بصورت زیر است:

$$P = \chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^{(2)} + \chi^{(3)} E^{(3)} + \dots \quad (2.1)$$

که $\chi^{(i)}$ ثابت پذیرفتاری است. هرگاه $\chi^{(2)} = \chi^{(3)} = \dots = 0$ باشد ماده خطی است و هرگاه $\chi^{(i)}$ یک عدد باشد ماده همگن نیز هست.

بعلاوه فرض می‌کنیم مواد سازنده فیبر شفاف هستند یعنی قسمت مجازی آنها نسبت به قسمت حقیقی بسیار کوچک است. همچنین هرگونه جملات غیرخطی در ضریب شکست را بصورت یک اختلال در نظر می‌گیریم. ضریب شکست این مواد همگی به طول موج میدان اعمال شده بستگی دارد. این بستگی از طریق رابطه Sellmeyer بیان می‌شود که بصورت زیر است:

$$n_k = \left[1 + \sum_{p=1}^3 \frac{A_{kp} \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_{kp}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

که n_k ضریب شکست ماده k ، A_{kp} ضرایب Sellmeyer، λ_{kp} طول موج‌های تشدید و λ طول موج میدان اعمال شده هستند.

رابطه (2.2) مقدار ضریب شکست را، هنگامی که طول موج اعمال شده با طول موج شدید اختلاف قابل ملاحظه‌ای دارد، با دقت زیاد بدست می‌دهد. در پیوست (A) نوع مواد سازنده فیبر و ضرائب Sellmeir ارائه شده‌اند.

2-2 تقریب هدایت ضعیف :

منظور از تقریب هدایت ضعیف این است که داشته باشیم $\Delta = \left| \frac{n_{i+1} - n_i}{n_i} \right| \ll 1$. هرگاه این شرط همراه شرطهای دیگری برقرار باشد محاسبه میدان الکتریکی داخل موج بر بسیار راحت می‌شود. شرطهای دیگر عبارتند از:

۱- قسمت زمانی موج اعمال شده نوسانی، یعنی بصورت $e^{i\omega_0 t}$ باشد

۲- برای ضریب شکست شرط $n = n(x, y)$ برقرار باشد. (محور z در امتداد محور موج بر استوانه‌ای است).

در این صورت می‌توان میدان الکتریکی اعمال شده را بصورت $E = E_0 e^{-\frac{t^2}{\tau^2}} \psi(r, \theta) e^{i(\omega_0 t - \beta z)}$ نمایش داد که در آن ω_0 فرکانس موج اعمال شده، β ثابت انتشار، τ زمان پایداری موج و $\psi(r, \theta)$ تابع موج اسکالر است که در رابطه زیر صدق می‌کند: (پیوست B)

$$\nabla_t^2 \psi(r, \theta) + (k_0^2 n_i^2 - \beta^2) \psi(r, \theta) = 0 \quad (2-3)$$

که در آن $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ عدد موج و n_i ضریب شکست لایه i ام است. ∇_t^2 قسمت عرضی عملگر لاپلاسی

است که در مختصات استوانه‌ای به شکل زیر است:

$$\nabla_t^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) \hat{u}_r + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \hat{u}_\theta \quad (2-4)$$

به علاوه می‌دانیم فرکانس موج اعمال شده در حدود 10^{14} Hz و زمانی پایداری موج $\tau_0 \approx 0.1 \text{ ps}$ است. بنابراین:

$$f = 10^{14} \text{ Hz} \Rightarrow t \approx 10^{-14} \text{ s} = 0.01 \text{ ps}$$

یعنی عبارت $e^{\left(-\frac{t}{\tau_0}\right)^2}$ مقداری بین $e^0 = 1$ تا $e^{-\frac{1}{100}} = 0.99$ دارد.