۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی برق

افزاره‌های تار (فیبر) نوری

جلد اول:

تقویت‌کننده‌های تار (فیبر) نوری آلاییده به اربیوم» و «رامان»

تالیف:

دکتر نصرت ا... کرانپایه

دکتر نجمه نزهت

دکتر علیرضا مولا

بهار ۱۳۹۴

www.ketab.ir

سرشناسه	:	گرانپایه، نصرت الله، ۱۳۳۱
عنوان و نام پدیدآور	:	افزاره‌های تار (فیبر) نوری
مشخصات نشر	:	تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، انتشارات، ۱۳۹۳-
مشخصات ظاهری	:	ج.: مصور، جدول، نمودار.
شابک	:	978-600-6383-96-5
وضعیت فهرست نویسی	:	فیپای مختصر
یادداشت	:	این مدرک در آدرس http://opac.nlai.ir قابل دسترسی است.
یادداشت	:	واژه‌نامه.
یادداشت	:	کتابنامه.
مندرجات	:	ج.۱. تقویت‌کننده‌های تار (فیبر) نوری «آلاییده به اربیوم» و «رامان»
شناسه افزوده	:	نزهت، نجمه، ۱۳۶۱-
شناسه افزوده	:	مولی، علیرضا، ۱۳۶۰-
شناسه افزوده	:	دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی- انتشارات
شماره کتابشناسی ملی	:	۳۷۶۸۰۵۱

ناشر: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی http://publication.kntu.ac.ir

نام کتاب: افزاره های تار (فیبر) نوری جلد اول تقویت کننده های تار (فیبر) نوری «آلاییده به اربیوم» و «رامان»

مؤلفین: دکتر نصرت ا... گرانپایه عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دکتر نجمه نزهت و دکتر علیرضا مولی

نوبت چاپ : اول

تاریخ چاپ : ۱۳۹۴

تیراژ : ۲۵۰ جلد

قیمت : ۱۳۰۰۰ تومان

کد کتاب : ۳۸۲

شابک : ۵-۹۶-۶۳۸۳-۶۰۰ -۹۷۸ ISBN: 978- 600-6383-96-5

صحافی: گرنامی

آدرس و تلفن مرکز پخش و فروش: خیابان ولیعصر(عج)، بالاتر از میدان ونک، تقاطع میرداماد، روبروی ساختمان اسکان (۸۸۷۷۲۲۷۷-۰۲۱)

(حق چاپ برای ناشر محفوظ است)

www.ketab.ir

پیشگفتار

اولین سامانه‌های مخابراتی بشر، نوری بوده‌اند. استفاده از علائم خاص با دود و آتش را می‌توان اولین تلگراف‌های نوری و فوتوفون الکساندر گراهام بل را اولین تلفن نوری دانست، که به دلیل پایین بودن کیفیت انتقال نور در جو و نبودن امکانات کافی، به مرور با نوع الکتریکی جایگزین شدند. با اختراع انواع لیزر در اواخر دهه ۱۳۳۰ شمسی، استفاده از نور همدوس[1] آن برای مخابرات مورد توجه واقع شد، ولی مسافت کوتاه انتشار آن در فضا و بالا بودن تلفات تار نوری در آن زمان، مانع می‌شد. با خالص کردن شیشه تارهای نوری ساخته شده، در ۱۳۵۶ شمسی اولین پیونده[2] مخابرات تار نوری چند مود در طول‌موج ۸۰۰ نانومتر آزمایش شد. در دهه ۱۳۵۰ شمسی تارهای نوری تک مود برای مخابرات در طول‌موج ۱۳۰۰ نانومتر و سپس ۱۵۵۰ نانومتر به کار برده شدند.

در کنار تلاش برای استفاده از تار نوری برای ارسال سیگنال‌های مخابراتی، مغزی کوچک تار نوری کاربردهای فراوانی همچون حسگرهای نوری، تقویت‌کننده‌ها و لیزرهای تار نوری را به ذهن می‌آورد. ساخت و آزمایش تار نوری آلاییده به اربیوم در ۱۳۶۵ شمسی انقلاب بزرگی در مخابرات نوری بود. وجود این تقویت‌کننده‌ها، استفاده از سامانه تسهیم طول‌موجی[3] را امکان پذیر ساخت که عرض باند تار نوری را بسیار فراتر از آن چه فکر می‌شد، برد [۱].

تقویت‌کننده‌های تار نوری آلاییده به اربیوم، به دلیل تطبیق کامل با تار نوری معمولی، پهنای باند زیاد، بهره بالا، عدد نویز کم، قدرت خروجی قابل ملاحظه، راندمان و قابلیت اطمینان بالا، قیمت، حجم و وزن کم، امروزه یکی از افزاره‌های اصلی سامانه‌ها و شبکه‌های مخابرات نوری امروزی هستند.

---

[1] Coherent light
[2] Link
[3] Wavelength division multiplexing

www.ketab.ir

کتاب حاضر جلد اول مجموعه کتاب‌های افزاره‌های تار (فیبر) نوری است، که تا کنون دو جلد آن به مرحله چاپ رسیده است. این جلد «تقویت‌کننده‌های تار (فیبر) نوری آلاییده به اربیوم» و «رامان» است. عنوان جلد دوم لیزرهای تار (فیبر) نوری «آلاییده به عنصرهای کمیاب خاک» و «رامان» است. در کتاب حاضر مروری کوتاه به اصول فیزیکی و رابطه‌های تئوری حاکم بر تقویت‌کننده تار نوری آلاییده به اربیوم می‌شود. با توجه به ناصاف بودن طیف بهره تقویت‌کننده تار نوری آلاییده به اربیوم، تلاش وسیعی برای صاف کردن این طیف خصوصا برای کاربرد در سامانه‌های WDM شده است. تقویت‌کننده رامان بر اساس پراش برانگیخته رامان هم به تنهایی قابل استفاده است و هم می‌تواند با استفاده از چند دمش (پمپ) مختلف باعث صاف شدن بهره تقویت‌کننده آلاییده به اربیوم شود. اصول فیزیکی و رابطه‌های ریاضی حاکم بر تقویت‌کننده‌های تار نوری رامان آورده شده‌اند. عملکرد دو نوع تقویت‌کننده تار نوری آلاییده به اربیوم و رامان به صورت مستقل شبیه‌سازی شده‌اند. برای صاف کردن طیف بهره تقویت‌کننده تار نوری آلاییده به اربیوم، از تقویت‌کننده تار نوری رامان با چند دمش استفاده شده، که برای گرفتن بهترین نتیجه از روش بهینه سازی اجتماع ذرات استفاده شده و صاف ترین طیف ممکن بدست آمده است.

در اینجا لازم می‌دانم از **سرکار خانم الهام کبیری** که با علاقه و دقت تمام طرح روی جلد کتاب را تهیه نمودند، تشکر و قدردانی کنم. ایشان در شرایط زندگی در خارج از کشور با صبر و حوصله و اعمال سلیقه عالی طرح روی جلد را به زیبایی آماده و برایم ارسال کردند. از **داوران محترم** کتاب که برایم ناشناس هستند، ولی در اصلاح و ارتقای کتاب سهم ارزشمندی داشتند، تشکر می‌کنم.

شک نیست که در چاپ نخست، کتاب دارای نواقص است، که از خوانندگان و سروران گرامی تقاضا دارم، محبت نموده و توصیه‌ها و راهنمایی‌های ارزنده خود را توسط رایانامه به نشانی (granpayeh@eetd.kntu.ac.ir) برایم ارسال فرمایند، تا در چاپ‌های بعدی، به کلیه آن‌ها ترتیب اثر داده و ویرایش‌های لازم را انجام دهم.

www.ketab.ir

فهرست مطالب

پیشگفتار ..... ه

فهرست مطالب ..... ط

فصل نخست ۱

مقدمه ۱

مقدمه ۳

الف- پهنای باند ۶

ب- بهره بالا ۷

ج- عدد نویز کم ۷

د- قدرت خروجی بالا ۸

ه- بازده بالا ۸

و- قابلیت اطمینان ۹

فصل دوم ۱۱

اصول فیزیکی تقویت‌کننده‌های تارنوری ۱۱

۲-۱- مقدمه ۱۳

۲-۲- پدیده‌های جذب و تابش ۱۳

الف) جذب ۱۳

ب) تابش خودبه‌خودی ۱۴

ج) تابش برانگیخته ۱۴

۲-۳- مشخصات تارهای آلاییده به فلزهای کمیاب خاک ۱۵

۲-۳-۱- خصوصیات عنصرهای کمیاب خاک ۱۵

۲-۳-۲- ترازهای انرژی اربیوم در شیشه سیلیکا ۱۷

www.ketab.ir

۲-۴- تبادل انرژی بین ترازهای عنصرهای کمیاب خاک ۱۸
۲-۴-۱- تابش برانگیخته تابشی و غیرتابشی ۱۸
۲-۴-۲- جذب حالت برانگیخته ۲۰
۲-۴-۳- جذب غیرمستقیم انرژی ۲۴
۲-۵- گسترش طیف لیزر ۲۷
۲-۶- سطح مقطع جذب و تابش و عوامل تأثیرگذار بر آن ۳۰

فصل سوم ۳۷

مدل ریاضی تقویت‌کننده‌های تار نوری آلاییده به اربیوم ۳۷

۳-۱- مقدمه ۳۹
۳-۲- معادله‌های نرخ در یک سامانه با سه تراز انرژی ۳۹
۳-۳- بهره و ضریب بهره تقویت‌کننده تار نوری ۴۱
۳-۴- تابش خودبه‌خودی تقویت شده ۴۵
۳-۵- معادله‌های کلی تقویت‌کننده تار نوری ۴۶

فصل چهارم ۵۳

مدلِ تحلیلیِ معادله‌هایِ نرخِ تقویت‌کننده‌هایِ تارِ نوریِ آلاییده به اربیوم ۵۳

۴-۱- مقدمه ۵۵
۴-۲- معادله‌های نرخ در حالت آلایندگی پله‌ای مغزی به اربیوم ۵۵
۴-۳- معادله‌های نرخ در حالت انباشتگی اربیوم در محور مغزی ۵۸
۴-۴- مدل تحلیلی در حالت دمش بسیار قوی ۵۹
۴-۵- مدل تحلیلی برای بهره‌های پایین ۶۳

فصل پنجم ۹۹

اجزا و مشخصه‌های تقویت‌کننده‌های تار نوری آلاییده به اربیوم ۹۹

www.ketab.ir

۵-۱- مقدمه ۱۰۱
۵-۲- اجزای تقویت‌کننده تار نوری آلاییده به اربیوم ۱۰۱
۵-۳- ترکیب‌کننده‌های سیگنال و دمش ۱۰۲
۵-۴- ایزولاتور ۱۰۴
۵-۵- پارامترهای مهم در طراحی تقویت‌کننده ۱۰۶
۵-۵-۱- بهره و طول بهینه‌ی یک تقویت‌کننده تار نوری ۱۰۶
۵-۵-۲- پیدایش تابش خودبه‌خودی تقویت شده ۱۱۱
۵-۵-۳- بهره سیگنال و تابش خودبه‌خودی تقویت شده در تارهای نوری کوتاه و بلند ۱۱۲
۵-۵-۴- تغییرات بهره تقویت‌کننده نسبت به طول تار نوری ۱۱۵
۵-۵-۵- طیف دمش خودبه‌خودی تقویت شده ۱۱۶
۵-۵-۶- طیف بهره سیگنال تک ۱۱۸
۵-۵-۷- اشباع بهره سیگنال ۱۱۸

فصل ششم **۱۲۱**

تقویت‌کننده‌های تاری رامان و ترکیبی **۱۲۱**

۶-۱- مقدمه ۱۲۳
۶-۲- تقویت‌کننده تاری رامان ۱۲۳
۶-۲-۱- تقویت رامان ۱۲۴
۶-۲-۲- تقویت رامان یک سیگنال توسط دمش تک‌رنگ ۱۲۷
۶-۲-۳- تقویت‌کننده رامان توزیع‌شده و گسسته ۱۲۹
۶-۲-۴- تقویت‌کننده رامان با دمش چند طول‌موجی در سامانه‌های WDM ۱۳۰
۶-۲-۵- منابع نویز در تقویت‌کننده رامان ۱۳۰
۶-۳- تقویت‌کننده ترکیبی اربیوم-رامان ۱۳۲
۶-۳-۱- تقویت‌کننده ترکیبی باریکباند ۱۳۵

www.ketab.ir

۶-۳-۲- تقویت‌کننده ترکیبی پهن‌باند یک‌پارچه ۱۳۶
۶-۳-۳- مقایسه مشخصات EDFA، FRA، و FRA-EDFA ترکیبی ۱۳۷

فصل هفتم **۱۳۹**

شبیه‌سازی و بهینه‌سازی تقویت‌کننده‌های تار نوری آلاییده به اربیوم، رامان، و ترکیبی **۱۳۹**

۷-۱- مقدمه ۱۴۱
۷-۲- شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ۱۴۱
۷-۲-۱- شبیه‌سازی تقویت‌کننده تار نوری آلاییده به اربیوم ۱۴۱
۷-۲-۲- شبیه‌سازی تقویت‌کننده رامان ۱۴۸
۷-۲-۳- روش‌های بهینه‌سازی ۱۵۸
۷-۲-۳-۱- الگوریتم ژنتیک ۱۵۹
۷-۲-۳-۲- روش اجتماع ذرات ۱۶۲
۷-۲-۴- بهینه‌سازی تقویت‌کننده تار نوری آلاییده به اربیوم ۱۶۵
۷-۲-۵- بهینه‌سازی تقویت‌کننده رامان ۱۷۰
۷-۲-۶- شبیه‌سازی و بهینه‌سازی تقویت‌کننده ترکیبی ربیوم-رامان ۱۷۵

مرجع‌ها **۱۸۱**

واژه‌نامه انگلیسی-فارسی **۱۸۹**

واژه‌نامه فارسی-انگلیسی **۲۰۳**

www.ketab.ir