

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه تربیت مدرس جانی

مهندسی لیزر و مخابرات نوری فضای آزاد

ترجمه و تالیف:

دکتر سعید علیائی

استاد دانشگاه تربیت مدرس شهید رجائی

دکتر الناز قهرمانی راد

سر شناسنامه	: علیائی، سعید، ۱۳۵۳-
عنوان و نام پدید آور	: مهندسی لیزر و مخابرات نوری فضای آزاد/ ترجمه و تألیف: سعید علیائی، الناز قهرمانی راد
مشخصات نشر	: تهران: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، ۱۳۹۳.
مشخصات ظاهری	: ۴۰۳ ص.: مصور، جدول، نمودار.
شابک	: ۹-۳۰-۶۵۹۴-۶۰۰-۹۷۸
وضعیت فهرست نویسی	: فیبا.
موضوع	: لیزر
موضوع	: ارتباطات نوری
موضوع	: الیاف نوری
شناسه افزوده	: قهرمانی راد، الناز، ۱۳۶۴-
شناسه افزوده	: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی
رده بندی کنگره	: TA ۱۶۷۵/ع۸م۹ ۱۳۹۳
رده بندی دیویی	: ۶۲۱/۳۶۶
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۶۱۲۸۸۴



سازمان اسناد و کتابخانه ملی جمهوری اسلامی ایران

عنوان	: مهندسی لیزر و مخابرات نوری فضای آزاد
ترجمه و تألیف	: دکتر سعید علیائی، استاد دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، دکتر الناز قهرمانی راد
ویراستار ادبی	: عاطفه نجیبی
چاپ اول	: پاییز ۱۳۹۳
چاپ دوم	: تابستان ۱۳۹۷
انتشارات	: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی
لیتوگرافی	: فرانقش
چاپ	: شریف
طراح جلد	: صابر یحیی پور
صفحه آرا	: عاطفه نجیبی
ناظر چاپ	: محمد معتمدی نژاد
کارشناس	: نیره فیروزی
شمارگان	: ۵۰۰ جلد
قیمت	: ۳۰۰,۰۰۰ ریال
شابک	: ۹-۳۰-۶۵۹۴-۶۰۰-۹۷۸ ISBN: 978-600-6594-30-9

کلیه حقوق این اثر برای مؤلفین و مترجمین و دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی محفوظ است.
 نشانی: تهران، لویزان - کد پستی ۱۵۸۱۱-۱۶۷۸۸ - صندوق پستی ۱۶۳ - ۱۶۷۸۵ - تلفن: (۲۶۲۲) ۹ - ۰۶۰-۲۲۹۷۰۰۶۰،
 ۲۲۹۷۰۰۷۰، نامبر: ۲۲۹۷۰۰۰۳، پست الکترونیکی: Publish@sru.ac.ir، وب سایت: http://Publish.sru.ac.ir

تقدیم به

همسرم

و پسر، آرتین

از طرف سعید علیانی

تقدیم به

پدر و مادرم

از طرف الناز قهرمانی راد



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



یرفع الله الذین آمنوا کما یرفع الذین آمنوا الی الله الذین هم الیها یرجعون
رشد دانش و پرورش دکتر فرزانه اسل ایرانی - اسلامی همواره در گوشه سنگینی، کوشش و پویایی اصحاب قلم بوده است. آنگاه که در طلب ربانی از
طقت، رهنورد و سرگذشت، بی تمهید برپنج نیلوفری فرازی آینه با دانش خورش، بشریت را از ظلمت جل به روشنی نور راه می برند.

دانشجوی فرهیخته سرکار خانم الناز قهرمانی راد

مترجم اثر ارزشمند «مهندسی لیزر و محاسبات نوری فضای آزاده»

حیات داوران، اثر سرکار عالی را به عنوان کتاب شان تقدیر کرده و فنی و مهندسی شاخصه برق شناخته است.

ایک شمن عرض تبریک،

لوح سپاس

بیست و سومین دوره جشنواره کتاب سال دانشجویی

به شما اهداء می شود. تأیید و توفیق روز افزون شما را از خداوند متعال خواستاریم.

دکتر سعید پور علی
معاون فرهنگی جهاد دانشگاهی

۱۳۹۵ آبان

دکتر حمید رضا طیبی
رئیس جهاد دانشگاهی

پیش‌گفتار

از اختراع لیزر¹ در سال 1960 تا کنون، پیشرفت‌های چشم‌گیری در توسعه انواع آن و نیز کاربردهای آن صورت گرفته است، طوری که تصور دنیای پیشرفته فن‌آوری امروز، بدون بهره‌گیری از لیزر مشکل به نظر می‌رسد. کلمه لیزر برگرفته از کلمات زیر است:

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

این عبارت، به مفهوم تقویت نور توسط گسیل القایی اشاره دارد که در فصل‌های مختلف این کتاب به دفعات متعدد با مفاهیم آن روبه‌رو خواهیم شد. تلاش برای ساخت لیزر پس از ساخت میزرها² بود (مخفف همین کلمات است جز این که به جای عبارت نور باید عبارت میکروویو را جایگزین کرد). با توجه به امکان ساخت افزاره‌های مجتمع تمام‌نوری، برخی از سامانه‌های الکترونیکی به تدریج جای خود را به سامانه‌های نوری می‌دهند. در بیشتر این سامانه‌ها، لیزر به عنوان منبع نور پایدار و همدوس نقش اساسی دارد. ایده انتقال اطلاعات به‌وسیله نور که برای نخستین بار توسط الکساندر گراهام بل، مخترع معروف تلفن، شکل گرفت (تلفن نوری و یا فوتوفون)، اگر با موفقیت همراه بود، شاید اکنون دنیای فن‌آوری مسیر دیگری را می‌پیمود. هرچند تلاش‌های اولیه برای انتقال اطلاعات توسط نور به دلیل وجود نداشتن محیط‌های انتقال با ناخالصی کم با شکست مواجه شد، اما با ارائه فیبرهای نوری در دهه 70 و اکنون با استفاده از فن‌آوری نور فضای آزاد، انتقال داده‌ها با سرعت‌های بسیار بالا قابل دسترس است. شاید همه این‌ها در نگاه نخست مدیون اختراع لیزر در سال 1960 توسط تئودور میمن (لیزر یاقوتی) و ابداع و توسعه لیزر توسط دانشمندان دیگر در سال‌های پس از آن باشد. اختراع لیزر هلیوم-نئون توسط علی جوان چند ماه پس از اختراع نخستین لیزر، به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع لیزری مورد استفاده در نانومترولوژی، نمونه‌ای از این دست است.

در این کتاب، قصد داریم تا ضمن توصیف پدیده‌ها و سازوکارهای تاثیر گذار بر عملکرد لیزرها به طور عام، به بررسی انواع لیزر در حد حوصله این کتاب بپردازیم و به یکی از مهم‌ترین کاربردهای لیزر در فن‌آوری نور فضای آزاد اشاره کنیم. به همین دلیل، در فصل نخست کتاب در خصوص نور همدوس صحبت کرده و نگاهی اجمالی به عملکرد لیزر خواهیم داشت. سپس نوسان‌گرهای نوری و مبحث مهم کاواک فابری-پرو را در فصل دوم ارائه می‌دهیم. به دلیل اهمیت پرتو گوسی، فصل سوم به این موضوع اختصاص یافته است. گسیل القایی نیز که اساس کار لیزر به-

¹ LASER

² MASERs

حساب می‌آید، تقویت‌کننده‌های نوری که محیط اصلی لیزر را تشکیل می‌دهند و اصل نوسان لیزر که در آن به شرایط پایین و بالای آستانه پرداخته می‌شود، به ترتیب در فصل‌های چهارم تا ششم پرداخته می‌شوند. عملکرد لیزر به‌طور کلی می‌تواند در حالت موج پیوسته و پالسی باشد که تا حد زیادی حوزه کاربرد لیزر را نیز مشخص می‌کند. دستیابی به لیزرهایی با توان بسیار بالا و نیز دستیابی به پایداری بسیار بالا در خروجی لیزرهای موج پیوسته و پالسی در فصل‌های هفتم و هشتم توصیف می‌شوند. سپس در فصل نهم مروری بر انواع لیزرها خواهیم داشت و از جنبه‌های محیط تقویت‌کننده یا سامانه پمپاژ، تقسیم‌بندی‌هایی در این خصوص خواهیم داشت. دو فصل انتهایی کتاب نیز به یکی از کاربردهای مهم و به‌روز لیزر در خصوص مخابرات نوری و مخابرات نور فضای آزاد می‌پردازد. به دلیل اهمیت این موضوع، این کاربرد، تاثیر به‌سزایی در انتخاب عنوان این کتاب داشته است.

به منظور سهولت دسترسی خوانندگان محترم به معادل کلمات، علاوه بر قراردادن زیرنویس‌ها، در انتهای کتاب واژه‌نامه فارسی به انگلیسی و انگلیسی به فارسی آورده شده است تا ضمن ایجاد متنی روان و با واژگان اصیل فارسی، امکان دسترسی سریع به اصل واژه نیز فراهم گردد. نمایه انتهای کتاب نیز سریع‌ترین راه برای دستیابی به مفاهیم، بدون صرف وقت زیاد برای جستجو در متن کتاب است. در واقع این کتاب را می‌توان ادامه کتاب ”مقدمه‌ای بر فوتونیک“ دانست که در سال 1388 چاپ و در سال 1393 تجدید چاپ گردید. عمده محتوای این کتاب نیز برگردان بخش‌هایی از کتاب وزین ”مقدمه‌ای بر فوتونیک و لیزر“¹ نوشته دکتر ریچارد کویمبای² است که مباحث لیزر آن به همراه مباحثی از مخابرات نور فضای آزاد آورده شده است.

در انتها جا دارد از کلیه عزیزانی که در ترجمه و تالیف این کتاب ما را یاری کرده‌اند تشکر کنیم. لازم است از داوران گرامی که این کتاب را بازبینی و با ارائه نکات و پیشنهادهای ارزنده، ما را در جهت بهبود نگارش علمی و محتوایی یاری رساندند تشکر و قدردانی نماییم. از دوست عزیزم، آقای مهندس صابر یحیی‌پور برای تهیه طرح جلد سپاسگزاریم. همچنین لازم است مراتب عمیق قدردانی خود را تقدیم سرکار خانم نجیبی کنیم که با حوصله فراوان، ویرایش ادبی متن را بر عهده داشتند. هرچند مطالب کتاب بارها و بارها مطالعه و ویرایش شده است، اما در داشتن اشکالات شکلی و مفهومی خالی از ایراد نیست. بدون شک دریافت پیشنهادهای ارزنده خوانندگان گرامی، ما را در بهبود سطح علمی و ادبی این مجموعه یاری‌گر خواهد بود.

سعید علیائی و الناز قهرمانی‌راد

شهریورماه 1393

s_olyaee@sru.ac.ir

¹ Photonics and Lasers: An Introduction

² Richard S. Quimby

فصل 1: لیزر و نور همدوس

- 1 1-1 نگاهی بر عملکرد لیزر
 4 2-1 همدوسی نوری
 5 1-2-1 همدوسی زمانی
 10 2-2-1 همدوسی فضایی
 13 3-2-1 درخشندگی
 17 مسأله‌ها

فصل 2: نوسان‌گرهای نوری

- 19 1-2 فرکانس‌های مود
 19 1-1-2 رفتار یک بعدی
 24 2-1-2 رفتار سه بعدی
 26 2-2 عرض مود
 26 1-2-2 طول عمر فوتون
 30 2-2-2 ضریب کیفیت Q
 31 3-2-2 ظرافت کاواک
 33 3-2 تداخل سنج فابری-پرو
 38 مسأله‌ها

فصل 3: اپتیک پرتو گوسی

- 41 1-3 پرتوهای گوسی در فضای آزاد
 42 1-1-3 توزیع شدت
 45 2-1-3 شدت قله
 48 2-3 پرتوهای گوسی در کاواک لیزر
 48 1-2-3 معیار پایداری در نوسان‌گر متقارن
 52 2-2-3 معیار پایداری در نوسان‌گر نامتقارن
 53 3-2-3 مودهای مرتبه بالاتر

- 58 3-3 پرتوهای گوسی عبوری از طریق عدسی (لنز)
- 61 1-3-3 پرتو گوسی کانونی شده
- 65 2-3-3 موازی سازی پرتو گوسی
- 69 مسأله‌ها

فصل 4: گسیل القایی و بهره نوری

- 73 1-4 نرخ گذار
- 74 1-1-4 پرتو دهی (نشعشع) باند پهن
- 84 2-1-4 پرتو دهی باند باریک
- 89 2-4 بهره نوری
- 89 1-2-4 ضریب بهره
- 93 2-2-4 سطح مقطع بهره
- 99 3-2-4 طول عمر فلورسان
- 102 4-2-4 عملکرد کوانتومی
- 104 5-2-4 تابع شکل خط
- 109 مسأله‌ها

فصل 5: تقویت کننده‌های نوری

- 113 1-5 ضریب بهره
- 113 1-1-5 روش معادله نرخ
- 118 2-1-5 اشباع بهره
- 121 2-5 بهره کل تقویت کننده
- 122 1-2-5 بهره سیگنال کوچک
- 124 2-2-5 بهره سیگنال بزرگ
- 128 3-2-5 بهره تقویت کننده: حالت کلی
- 131 مسأله‌ها

فصل 6: نوسان لیزر

- 133 1-6 شرط آستانه
- 138 2-6 بالای آستانه لیزر
- 138 1-2-6 روش معادله نرخ
- 141 2-2-6 خروجی لیزر در حالت پایدار
- 144 3-2-6 بازدهی خروجی لیزر
- 154 مسأله‌ها

فصل 7: مشخصات لیزر موج پیوسته

- 157 1-7 طیف مود نور لیزر
- 158 1-1-7 گذار لیزری تک‌مود
- 158 2-1-7 گذار لیزری چندمود
- 164 2-7 کنترل طول موج لیزر
- 165 1-2-7 دستیابی به لیزر تک‌مود
- 168 2-2-7 پایداری فرکانسی
- 170 3-2-7 تنظیم طول موج لیزر
- 173 مسأله‌ها

فصل 8: لیزرهای پالسی

- 175 1-8 پالس‌زنی کنترل نشده
- 178 2-8 پمپاژ پالسی
- 178 3-8 نظریه کلیدزنی - Q
- 182 4-8 روش‌های کلیدزنی - Q
- 182 1-4-8 آینه دوار
- 183 2-4-8 شاتر الکترواپتیک
- 185 3-4-8 شاتر آکوستواپتیک
- 189 4-4-8 کلیدزنی - Q غیرفعال

- 191 5-8 نظریه مود قفل شده
- 191 1-5-8 دو مود لیزری
- 192 2-5-8 N مود لیزری
- 196 3-5-8 پهنای پالس
- 197 4-5-8 زمان تکرار پالس
- 201 5-5-8 انرژی پالس
- 202 6-8 روش‌های قفل‌شدگی مود
- 202 1-6-8 قفل‌شدگی مود فعال
- 204 2-6-8 قفل‌شدگی مود غیرفعال
- 208 مسأله‌ها

فصل 9: مروری بر انواع لیزرها

- 213 1-9 لیزرهای دارای پمپاژ نوری
- 214 1-1-9 گذار الکترونیکی
- 214 لیزر یاقوتی
- 218 لیزرهای نئودیمیم
- 225 سایر لیزرهای کمیاب خاک
- 229 2-1-9 لیزرهای فیبر
- 233 آستانه در یک سیستم چهار ترازی
- 237 بازدهی شیب در سیستم چهار ترازی
- 239 آستانه در سیستم‌های سه ترازی
- 246 بازدهی شیب در سیستم‌های سه ترازی
- 246 توان بالا
- 249 3-1-9 گذار ویبرونیک
- 249 لیزر رنگینه‌ای
- 255 لیزر تیتانیوم - یاقوت کبود
- 257 2-9 لیزرهای پمپ‌شده الکتريکی
- 258 1-2-9 گذار الکترونیکی

259	لیزر هلیوم - نئون
263	لیزر یون آرگون
266	لیزر اکسایمر
268	2-2-9 گذار ارتعاشی
275	مسأله‌ها

فصل 10: مخابرات نوری

279	1-10 سامانه‌های مخابرات فیبر نوری
284	2-10 مالتی‌پلکس سیگنال
284	10-2-1 الگوی داده
287	10-2-2 مالتی‌پلکس تقسیم زمانی
291	10-2-3 مالتی‌پلکس تقسیم طول موجی
294	بازدهی طیفی
296	مالتی‌پلکس‌های WDM
298	ترکیب کانال غیر خطی در مالتی‌پلکس تقسیم طول موجی
299	3-10 بودجه نوری در خط نوری فیبر
300	10-3-1 حساسیت گیرنده
306	10-3-2 پیشینه طول فیبر
309	وابستگی به نرخ بیت
313	10-4 تقویت‌کننده نوری
314	10-4-1 تقویت‌کننده فیبر آلاییده با اربیم
316	شفافیت بهره
317	طیف بهره
318	بهره مجتمع
323	اشباع بهره
324	مسطح کردن بهره
325	10-4-2 سایر تقویت‌کننده‌های نوری

- 328 سایر ناخالصی‌های خاک کمیاب
- 330 تقویت‌کننده‌های نیم‌رسانا
- 332 تقویت‌کننده‌های فیبر رامان
- 337 5-10 سامانه نوری فضای آزاد
- 341 تمرین‌ها

فصل 11: کلیات فن آوری نور فضای آزاد

- 347 1-11 مرور کلی بر چگونگی عملکرد نور فضای آزاد
- 349 2-11 فرستنده و گیرنده
- 350 3-11 عوامل تاثیرگذار بر سامانه نوری فضای آزاد
- 351 انتقال سیگنال‌های فروسرخ از طریق جو
- 351 1-3-11 پراکندگی
- 352 پراکندگی رالی
- 353 پراکندگی مای
- 354 2-3-11 جذب
- 355 پنجره‌های جوی
- 355 جاذب‌های جوی
- 357 3-3-11 اغتشاش
- 358 4-11 خط دید
- 359 تعیین خط دید

پیوست‌ها

- 361 پیوست الف- زاویه فضایی و نظریه درخشندگی
- 367 پیوست ب- ترکیب فوریه و اصل عدم قطعیت
- 377 مراجع
- 397 واژه‌نامه
- نمایه

فصل نخست

لیزر و نور همدوس

در دهه 1960 وقتی که لیزرها برای اولین بار توسعه پیدا کردند، اغلب به شوخی گفته می‌شد که "لیزر راه حلی در جستجوی مشکل" است. هرچند لیزر یک افزاره جدید با خواص جالب بود، اما مشخص نبود که چطور می‌تواند در عمل استفاده شود. امروزه، شرایط به‌طور کامل متفاوت است و لیزر فن‌آوری فعال با کاربردهایی متنوع از قبیل جاروب‌گر¹، خواندن و نوشتن داده روی لوح‌های فشرده، ایجاد ماسک برای لیتوگرافی نوری روی تراشه‌های مدار مجتمع، ارتباطات نوری، برش دقیق مواد برای ساخت و جراحی لیزری است. مبالغه نیست اگر بگوییم که بدون لیزر، دنیای فن‌آوری پیشرفته ما شباهتی به امروز نخواهد داشت.

چه چیزی موجب خاص شدن نور لیزر می‌شود؟ یک پاسخ کوتاه این است که نور لیزر همدوس² است. برای درک معنای این جمله، این فصل را با نگاهی کوتاه به اصول عملکرد لیزر آغاز می‌کنیم. در ادامه نگاهی دقیق به طبیعت نور همدوس و اهمیت همدوسی برای کاربردهای لیزر خواهیم داشت.

1-1 نگاهی بر عملکرد لیزر

شکل 1-1 سه مولفه اصلی لازم برای عملکرد لیزر را نشان می‌دهد. محیط بهره، نور را تقویت می‌کند، آینه‌ها (یا دیگر افزاره‌های بازتابی) بازخورد نوری³ را فراهم می‌کنند و با سازوکار پمپاژ⁴، تغذیه انرژی لیزر فراهم می‌شود. آینه‌ها برای چرخش نور به عقب و جلو

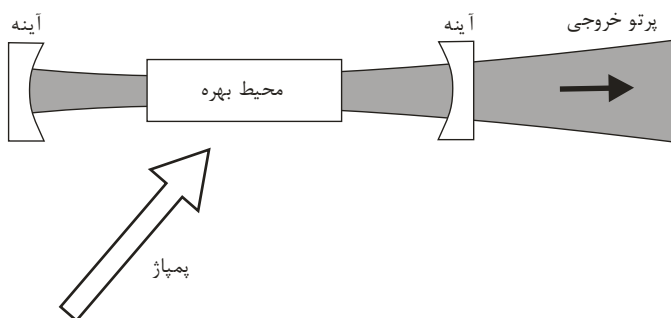
¹ Scanner

² Coherent

³ Optical feedback

⁴ Pumping

از طریق محیط بهره قرار داده شده‌اند و تشکیل کاواک¹ نوری یا نوسان‌گر نوری را می‌دهند. این بازخورد نوری به این مفهوم است که قسمتی از خروجی تقویت‌شده به ورودی بازخورد می‌شود تا باعث تقویت بیشتر شود. ترکیب بهره و بازخورد در مدارهای الکتریکی موضوع آشنایی است که منجر به نوسانات الکتریکی می‌شود. در حقیقت، لیزر از نظر مفهومی مشابه نوسان‌گر الکتریکی با فرکانس خیلی بالا (10^{14} ~ هرتز) است. مانند نوسان‌گر الکتریکی که نیاز دارد به برق وصل شود و یا توسط انرژی تغذیه شود، لیزر نیز به تغذیه شدن توسط انرژی از طریق پمپ نیاز دارد.



شکل 1-1 مولفه‌های اصلی لیزر.

اگرچه نوسان‌گرهای الکتریکی و نوری در مفهوم کلی شبیه هم هستند، اما به طور قابل ملاحظه‌ای در جزییات سه مولفه اصلی با یکدیگر متفاوت هستند. برای مثال، بازخورد الکتریکی می‌تواند به سادگی با اتصال یک مقاومت بین ورودی و خروجی تقویت‌کننده پیاده‌سازی شود. اما برای بازخورد نوری، ملاحظات دقیقی باید در طراحی نوسان‌گر نوری مناسب در نظر گرفته شود که در فصل دوم به بحث در مورد آن خواهیم پرداخت.

می‌توان گفت که سازوکار تقویت‌کردن، اساسی‌ترین اختلاف بین نوسان‌گرهای الکتریکی و نوری است. در لیزر، تقویت توسط گسیل القایی² رخ می‌دهد؛ فرآیندی که

¹ Cavity

² Stimulated emission