

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

فتونیک

جلد دوم

تألیف:

پروفسور حسن کاتوزیان

عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی برق
دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

تابستان ۱۴۰۲

سرشناسه	کاتوزیان، حسن، ۱۳۴۰-
عنوان و نام پدیدآور	فتونیک / تألیف حسن کاتوزیان.
مشخصات نشر	تهران: دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، ۱۳۸۴-۱۳۸۶.
مشخصات ظاهری	ج ۲: مصور، جدول، نمودار.
شابک	ج ۱: ۷-۲۷۳-۴۶۳-۹۶۴-۹۷۸ ج ۲: ۵-۳۱۹-۴۶۳-۹۶۴-۹۷۸
وضعیت فهرست‌نویسی	فیپا
یادداشت	صفحه عنوان به انگلیسی: Hassan Kaatuzian, Photonics
یادداشت	کتابنامه.
یادداشت	نمایه.
موضوع	فتونیک.
شناسه افزوده	دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران). مرکز نشر.
شناسه افزوده	Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic). Publishing Center.
رده‌بندی کنگره	۲۲/ک/۱۵۲۰ TA
رده‌بندی دیویی	۶۲۱/۳۶
شماره کتابشناسی ملی	۱۹۹۰۵-۸۴م



انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

عنوان کتاب	فتونیک (جلد دوم)
تألیف	حسن کاتوزیان
ناشر	انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
لیتوگرافی، چاپ و صحافی	انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
چاپ ششم	تابستان ۱۴۰۲
قیمت	۲۴۰,۰۰۰ تومان
تیراژ	۱۰۰
شابک	۹۷۸-۹۶۴-۴۶۳-۳۱۹-۵ ISBN : 978-964-463-319-5

آدرس مرکز پخش: خیابان ولیعصر، روبروی خیابان بزرگمهر، فروشگاه کتاب مرکز نشر

دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) - تلفن: ۶۶۴۹۸۸۶۸

وبسایت: <http://publication.aut.ac.ir>

حق چاپ برای ناشر محفوظ است.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل سوم - نور و تبدیلات فوریه مکانی	۱۱
۳-۱- مقدمه	۱۳
۳-۲- تبدیل فوریه مکانی	۱۴
۳-۲-۱- تعریف یک سامانه خطی و مستقل از مکان	۱۴
۳-۲-۲- تحلیل تبدیل فوریه مکانی در دو بُعد	۱۵
۳-۲-۳- قضایای مربوط به تبدیل فوریه مکانی	۱۵
۳-۲-۴- توابع جداپذیر	۱۷
۳-۲-۵- مثال‌هایی از توابع مکانی	۱۷
۳-۳- اصول تئوری اسکالر پراش	۲۰
۳-۳-۱- مقدمه	۲۰
۳-۳-۲- مقدمات ریاضی مسئله	۲۲
۳-۳-۳- تئوری گرین (Green)	۲۳
۳-۳-۴- تئوری انتگرال کیرشف و هلمهولتز	۲۴
۳-۳-۵- فرمول‌بندی کیرشف برای پراش توسط یک صفحه تخت	۲۶
۳-۳-۶- شرایط مرزی کیرشف	۲۷
۳-۳-۷- فرمول‌بندی فرنل - کیرشف و اصل هویگنس - فرنل	۲۸
۳-۳-۸- فرمول‌بندی ری - لی - زومرفیلد برای پراش از یک صفحه تخت	۳۰
۳-۳-۹- فرمول پراش ری - لی زومرفیلد	۳۱
۳-۳-۱۰- تقریب پراش فرنل	۳۲
۳-۳-۱۱- تقریب پراش فرانیهوفر	۳۴
۳-۴- عدسی‌ها و تبدیل فوریه مکانی	۴۲
۳-۴-۱- خواص تصویربرداری و تبدیل فوریه در عدسی‌ها	۴۲
۳-۴-۲- خاصیت تبدیل فوریه در عدسی‌ها	۴۵
۳-۴-۳- پاسخ به ضربه مکانی یک عدسی محدب	۴۷
۳-۵- فیلترهای مکانی و پردازش نوری علائم	۵۰
۳-۵-۱- تحلیل حوزه فرکانس سیستم‌های تصویربرداری نوری	۵۰
۳-۵-۲- فیلترهای فضایی (مکانی)	۵۱
۳-۵-۳- آزمایش آبه - پورتر (Abbe - Porter)	۵۳
۳-۵-۴- پردازشگرهای نوری آستیگمات	۵۵

صفحه	عنوان
۵۶	۳-۵-۵- فیلترهای فضایی و ندرلوگ
۵۸	۳-۵-۶- پردازش اطلاعات ورودی با استفاده از فیلتر و ندرلوگ
۶۰	۳-۵-۷- مزایا و موارد کاربرد فیلترهای و ندرلوگ
۶۱	۳-۵-۸- فیلترهای تطبیقی
۶۴	۳-۵-۹- شبیه سازی، طراحی و ساخت یک پردازشگر مرکب نوری
۷۲	۳-۵-۱۰- شناسایی چهره
۷۵	۳-۵-۱۱- هالوگرافی یا تمام نگاری
۸۳	فصل چهارم - مدارات مجتمع و یکپارچه نوری
۸۵	۴-۱- مقدمه
۸۶	۴-۲- تحلیل موجبرهای مسطح
۸۹	۴-۳- مشخصه مودها در موجبرهای مسطح
۸۹	۴-۳-۱- مودهای TE
۹۱	۴-۳-۲- مودهای TM
۹۲	۴-۴- تزویج بین مودهای موجبر
۹۴	۴-۵- موجبر با ساختار مکانی متناوب و فیلترهای DFB
۹۴	۴-۵-۱- موجبر لایه نازک متناوب
۹۶	۴-۵-۲- بررسی حالت خاص
۹۸	۴-۶- حل دستگاه معادلات تزویج مود
	۴-۷- تعمیم تحلیل فیلترهای متناوب DFB به تحلیل موجی
۱۰۱	لیزرهای DFB
۱۰۱	۴-۷-۱- مقدمه
۱۰۱	۴-۷-۲- بررسی خواص ماده ضخیم که متناوباً اغتشاش یافته است
۱۰۳	۴-۷-۳- تحلیل مشابه برای موجبر با ناحیه مرزی دنداندار شده (لیزر DFB)
۱۰۶	۴-۸- تئوری مودهای تزویج شده
۱۱۳	۴-۹- ساخت مدار مجتمع تزویج کننده های سمتی
۱۱۶	۴-۱۰- مدولاتور فاز ماک - زیندر
۱۱۹	فصل پنجم - نور غیر خطی
۱۲۱	۵-۱- مقدمه
۱۲۸	۵-۲- انتشار امواج نوری در محیط ناهمسانگرد
۱۲۸	۵-۲-۱- مقدمه

عنوان	صفحه
۵-۲-۲- تانسور دی الکتریک برای محیط ناهمسانگرد	۱۲۸
۵-۲-۳- تئوری پوینتینگ	۱۳۰
۵-۲-۴- امواج مسطح در محیط ناهمسانگرد	۱۳۱
۵-۲-۵- تعریف سرعت فاز، سرعت گروه و سرعت فلوی انرژی	۱۳۲
۵-۳- مروری بر حل معادلات دیفرانسیل غیر خطی و غیر همگن	۱۳۴
۵-۳-۱- مقدمه	۱۳۴
۵-۳-۲- روش پرتوربایسیون یا اعوجاج جزئی در حل معادلات غیر خطی	۱۳۵
۵-۳-۳- نوسانات واداشته غیر خطی مرتبه دوم	۱۳۷
۵-۳-۴- نوسانات واداشته غیر خطی مرتبه سوم	۱۳۸
۵-۳-۵- نوسانگر غیر خطی مرتبه دوم با دو فرکانس تحریک متفاوت	۱۳۸
۵-۴- رفتارهای غیرخطی نوری مرتبه دوم	۱۳۹
۵-۴-۱- مقدمه	۱۳۹
۵-۴-۲- تانسور پذیرفتاری غیر خطی نوری	۱۴۰
۵-۴-۳- تعبیر فیزیکی برای ضرائب غیر خطی نوری (dij)	۱۴۳
۵-۴-۴- تخمین ضریب D برای چاه پتانسیل نامتقارن	۱۴۵
۵-۴-۵- فرمول بندی واکنش غیرخطی طبق تئوری سوم نور الکترومغناطیس	۱۴۹
۵-۴-۶- تولید هماهنگ دوم فرکانس نوری (SHG)	۱۵۱
۵-۴-۷- تولید هماهنگ دوم با فرض تخلیه توان ورودی	۱۵۸
۵-۴-۸- روش های مدرن تولید هماهنگ دوم فرکانس نوری	۱۶۰
۵-۴-۹- تقویت پارامتری و نوسان پارامتری	۱۶۴
۵-۴-۱۰- مدل مکانیکی جرم و فنر برای نوسانگر کلاسیک	۱۶۵
۵-۴-۱۱- معادلات اساسی در تقویت پارامتری	۱۶۷
۵-۴-۱۲- نوسان پارامتری	۱۶۹
۵-۴-۱۳- تحلیل خود استوار برای نوسان پارامتری	۱۷۰
۵-۴-۱۴- چگونگی تنظیم فرکانسی در نوسانگرهای پارامتری	۱۷۵
۵-۴-۱۵- تبدیل به فرکانس نوری بالاتر	۱۷۷
۵-۴-۱۶- چند نقطه نظر کوانتومی	۱۸۰
۵-۵- رفتارهای غیرخطی نوری مرتبه سوم	۱۸۶
۵-۵-۱- مقدمه	۱۸۶
۵-۵-۲- پراکندگی مولکولی رامان	۱۸۸
۵-۵-۳- پراکندگی القایی رامان	۱۹۰
۵-۵-۴- بررسی پراکندگی القایی رامان با استفاده از تئوری نور الکترو مغناطیس	۱۹۲

صفحه	عنوان
۱۹۹	۵-۵-۵- بررسی پراکندگی القایی بریلوئین
۱۹۹	۵-۵-۶- به دست آوردن معادله حرکت
۲۰۲	۵-۵-۷- معادله موج الکترومغناطیسی
۲۰۶	۵-۵-۸- خاصیت خود کانون کنندگی اشعه نوری
۲۱۰	۵-۶- نور مزدوج فاز و اثر فتوانکساری
۲۱۰	۵-۶-۱- مقدمه
۲۱۴	۵-۶-۲- بیان تحلیلی اثر مزدوج فاز
۲۱۶	۵-۶-۳- انتقال علامت از طریق فیبرنوری پاشنده
۲۱۷	۵-۶-۴- تئوری مزدوج فاز به روش مخلوط سازی چهار موج
۲۲۳	۵-۶-۵- برآورد کمی از ثوابت و ضرائب تزویج
۲۲۴	۵-۶-۶- آرایش تجربی تولید موج مزدوج فاز
۲۲۶	۵-۶-۷- تشدیدگرهای نوری با آینه های مزدوج فاز (PCM)
۲۲۷	۵-۶-۸- چند مورد دیگر کاربرد عملی برای موج مزدوج فاز
۲۳۲	۵-۶-۹- معرفی اثر فتوانکساری
۲۳۵	۵-۶-۱۰- تزویج شعاع نوری و رخداد پدیده مزدوج فاز در کریستال های فتوانکساری
۲۴۲	۵-۶-۱۱- تشکیل توری
۲۴۵	۵-۷- سولیتون ها یا امواج منفرد (تک موج)
۲۴۵	۵-۷-۱- مقدمه
۲۴۸	۵-۷-۲- سولیتون های نوری
۲۵۰	۵-۷-۳- به دست آوردن معادله پوش سولیتون نوری با استفاده از معادلات موج
۲۵۴	۵-۸- شفافیت القایی الکترومغناطیسی (EIT)
۲۵۴	۵-۸-۱- ایده اولیه
۲۵۵	۵-۸-۲- چگونگی تعامل نور و ماده در اثر EIT
۲۵۶	۵-۸-۳- تشریح یک آزمایش تجربی
۲۶۳	فصل ششم- کلیدهای فتونیک
۲۶۵	۶-۱- مقدمه
۲۶۶	۶-۲- مشخصات کلی کلیدهای نوری
۲۶۷	۶-۳- چگونگی ساخت کلیدهای نوری
۲۶۷	۶-۳-۱- کلیدهای مکانیکی- نوری
۲۶۸	۶-۳-۲- کلیدهای الکتریکی- نوری و یا الکترواپتیک
۲۶۹	۶-۳-۳- کلیدهای اکوستوایپتیک و یا صوتی- نوری

عنوان	صفحه
۶-۳-۴ کلیدهای مغناطیسی - نوری و یا مگنتواپتیک	۲۶۹
۶-۳-۵ کلیدهای تمام نوری	۲۷۰
۶-۴- محدودیت‌های موجود در کلیدهای تمام نوری	۲۷۲
۶-۵- ادوات نوری با دو حالت پایدار	۲۷۴
۶-۵-۱ مقدمه	۲۷۴
۶-۵-۲ اصول دو حالتی بودن نوری	۲۷۶
۶-۵-۳ انواع روش‌های ساخت ادوات دو حالتی با عناصر غیر خطی	۲۷۷
۶-۵-۴ ادوات نوری مرکب و دو حالتی	۲۷۹
۶-۶- برقراری ارتباطات نوری بین ادوات نوری (Optical inter Connections)	۲۸۱
۶-۶-۱ مقدمه	۲۸۱
۶-۶-۲ ارتباطات نوری در فضای آزاد	۲۸۱
۶-۶-۳ برقراری ارتباطات نوری در ابعاد بسیار کوچک	
مدارهای میکروالکترونیک	۲۸۳
۶-۶-۴ انجام محاسبات در کامپیوترهای نوری	۲۸۵
فصل هفتم - نور کوانتم - فتونیک	۲۸۷
۷-۱- مقدمه	۲۸۹
۷-۲- جایگزین بوهم برای مکانیک کوانتمی	۲۹۲
۷-۳- فرمول‌بندی دقیق ریاضی تئوری بوهم	۲۹۸
۷-۴- تعبیر کوانتم فتونیک از واکنش نور و ماده	۳۰۰
۷-۵- تعبیر کوانتم فتونیک از ضریب انکسار نور	۳۰۱
۷-۶- مدل فیزیکی نانوسکوپی در توجیه ضریب انکسار	۳۰۳
۷-۷- ارائه یک مثال کاربردی	۳۰۶
۷-۷-۱ مشخصات کلی ماده (MNA)	۳۰۶
۷-۷-۲ تقریب تابع توزیع احتمال الکترون‌های پی	۳۰۸
۷-۷-۳ امکان طراحی و ساخت یک کلید یا سوئیچ نوری با (MNA)	۳۱۱
۷-۷-۴ نتایج شبیه‌سازی	۳۱۲
۷-۸- تعبیر کوانتم - فتونیک از پدیده انکسار نور	۳۱۵
۷-۸-۱ پیشنهاد رابطه نانوسکوپی انکسار	۳۱۵
۷-۸-۲ محاسبه نیروهای کوتاه‌برد بین اتمی	۳۱۸
۷-۸-۳ توجیه پدیده بازتابش کلی	۳۲۱
۷-۸-۴ کوانتم فتونیک و تعبیر پدیده پاشندگی نرمال	۳۲۳

صفحه	عنوان
۳۲۴	۷-۸-۵ تعبیر کوانتم - فتونیک از پدیده قطبش نور
۳۲۶	۷-۸-۶ مقایسه تعبیرات کوانتم - فتونیک با تعبیرات فاینمن
۳۲۸	۷-۸-۷ نتیجه گیری
۳۲۹	فصل هشتم - دورنمای آینده
۳۳۱	۸-۱-۱ مقدمه
۳۳۳	۸-۲-۱ فتونیک سیلیسمی
۳۳۵	۸-۳-۱ دیودهای نوری سیلیسمی
۳۳۷	۸-۴-۱ لیزرهای سیلیسمی
۳۳۹	۸-۵-۱ مدولاتورها و آشکار سازهای سیلیسمی
۳۳۹	۸-۶-۱ لیزر ترانزیستوری
۳۴۲	۸-۷-۱ ارتباطات نوری حتی درون یک تراشه به جای اتصالات
۳۴۴	۸-۸-۱ کریستال فتونیک
۳۴۶	۸-۹-۱ در مرزهای دانش
۳۴۶	۸-۹-۱ مقدمه
۳۴۷	۸-۹-۲ رویکرد الکترو دینامیک کوانتمی برای اثبات اصول
۳۵۱	۸-۹-۳ تئوری پنجم یا کوانتم - فتونیک چه چیز تازه ای می گوید؟
۳۵۵	تمرینات
۳۷۹	فهرست منابع و مراجع
۳۸۵	واژه های کلیدی
۳۹۱	نامنامه

پیش‌گفتار جلد دوم

سپاس به درگاه ایزد منان که سرانجام توانستم مطابق وعده‌ای که در پیش‌گفتار جلد اول کتاب فتونیک داده بودم، نگارش جلد دوم کتاب را که شامل مباحث پیشرفته در این زمینه می‌باشد، به پایان رسانم. علت تأخیر زمانی در انتشار جلد دوم، افزودن فصل دیگری در انتهای آن بوده که محتوایش، مستقیماً تأثیر گرفته از پیشرفت‌هایی است که طی یکی دو سال اخیر (۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ میلادی)، در عرصه فن‌آوری فتونیک، جهان، شاهد آنها بوده است و شایسته ندانستم بدون بحث راجع به این نوآوری‌ها، کتاب را به پایان برسانم. یکی از این تحولات، به مرحله عمل در آمدن آرزوی بالغ بر بیست ساله صاحبان صنایع الکترونیک مبنی بر تولید ادوات نوری با استفاده از عنصر سیلیسیم بوده که اختصاراً به این فن‌آوری، فتونیک سیلیسیمی نام نهاده‌اند. چنین پیشرفتی بدون تردید، تحولی عمده در ساخت مدارات مجتمع فوق فشرده محسوب می‌گردد. چرا که تا قبل از پایان دهه اول قرن بیست و یکم میلادی شاید بتوان انتظار ساخته شدن ریز پردازنده‌های الکترونیک فوق سریع و فوق متراکم را داشت که ارتباطات درون تراشه‌ای آنها، از طریق موجبرهای نوری انجام می‌پذیرد. به عبارت دیگر لیزر، مدولاتور، موجبر نوری و آشکارساز نوری در کنار مدارات الکترونیک، همه و همه به صورت یکپارچه روی یک تراشه سیلیسیمی قابل ساخته شدن خواهند بود.

موضوع مهم دیگر اختراع اولین لیزر ترانزیستوری بوده است. بدون تردید این دو تحول می‌توانند در سیر تحولات آتی در زمینه فن‌آوری فتونیک و سرعت رشد آن تأثیر مستقیم و مثبت گذارند.

جلد دوم کتاب با فصل سوم و با موضوع تبدیلات فوریه مکانی و پردازش نوری علائم آغاز خواهد گردید. در فصل چهارم چگونگی تزویج امواج الکترومغناطیسی در موجبرها و مخصوصاً در مدارات مجتمع نوری را مورد بحث قرار خواهیم داد. فصل پنجم کتاب که طولانی‌ترین فصل جلد دوم می‌باشد، خواننده را با علم نور غیر خطی و موارد کاربرد آن در مباحث پیشرفته فتونیک آشنا خواهد ساخت. چگونگی حل معادلات دیفرانسیل غیر خطی با استفاده از روش پرتو ریاسیون نحوه تولید هماهنگ‌های فرکانس نوری، پراکندگی‌های القایی مرتبه سوم، نور مزدوج فاز، سولیتون‌ها و شفافیت القایی الکترومغناطیس از مهمترین مباحثی است که در این فصل بدان‌ها پرداخته خواهد شد. موضوع فصل ششم، عملکرد سریع‌ترین کلیدهای فتونیک خواهد بود. فصل هفتم را به شرح تئوری پنجم نور یعنی

کوانتم - فتونیک اختصاص داده‌ام که حدود پانزده سال است روی توسعه آن به همراه دانشجویانم کار کرده‌ام. به لحاظ شباهت‌هایی که از نظر نحوه نگرش به جهان فیزیکی بین این تئوری و تئوری بوه‌م موجود است، لازم دانستم ابتدا به کارهای این دانشمند بزرگ و فقید قرن بیستم اشاراتی در همین فصل داشته باشم. سرانجام در فصل آخر یا هشتم کتاب نیز به چشم‌انداز آینده فن‌آوری فتونیک و تحقیقات نوین در عرصه علم نور شناخت خواهیم پرداخت و این مقوله را به پایان خواهیم رساند.

با آرزوی توفیق الهی

حسن کاتوزیان

تهران - بهار ۱۳۸۶

زمان چاپ نخست این کتاب به سال ۱۳۸۶ برمی گردد. اینک پس از ده سال از آن تاریخ، چاپ سوم کتاب فتونیک جلد دوم، که دربرگیرنده مفاهیم پیشرفته در زمینه مهندسی فتونیک می باشد، تقدیم علاقه مندان؛ بخصوص دانشجویان مقاطع کارشناسی ارشد و یا دکتری در رشته های مهندسی برق، کامپیوتر و فیزیک می گردد.

با آرزوی توفیق الهی

حسن کاتوزیان

زمستان ۱۳۹۵

فصل سوم

نور و تبدیلات فوریه مکانی

۳-۱- مقدمه

در نگارش این فصل کتاب، هدف، آشنایی دانشجویان و متخصصین مخصوصاً در رشته مهندسی برق با مفاهیم نور فوریه می‌باشد. کتاب‌های متعددی تاکنون در این باب نوشته شده‌اند. منتهی مخاطب اصلی آنها عمدتاً فیزیکدان‌ها بوده‌اند. به طوری که روی جنبه‌های ریاضی و روش‌های ریاضی مناسب در تئوری مدرن تصویربرداری کمتر تأکید شده است. از سوی دیگر، مهندسين برق به لحاظ بکارگیری ریاضیات در تحلیل شبکه‌های مدار الکتریکی، با جنبه‌های ریاضی موضوع آشناترند و کمتر به مفاهیم فیزیک قضیه پرداخته‌اند. لذا در این بخش، حداکثر استفاده را از آموخته‌های ریاضی خود از جمله تئوری سامانه‌های خطی و تجزیه و تحلیل فوریه، به منظور درک مفاهیم بنیادی نور فوریه خواهند نمود. تلفیق این دو آموخته فیزیک و ریاضی، به منظور فهم آسانتر ایده‌های مربوط به تشکیل و پردازش نوری تصاویر، تشکیل و بازسازی تصاویر سه‌بعدی (هالوگرافی یا تمام‌نگاری) ما را یاری خواهد داد. [۱]

در ادامه بخش، ابتدا ریاضیات مربوط به تبدیل فوریه مکانی را تشریح خواهیم نمود. سپس به بیان تئوری پراش طبق تئوری دوم موج اسکالر خواهیم پرداخت که ضمن آن تئوری گرین، تئوری انتگرال کیرشف و هلمهولتز و فرمول‌بندی ری-لی-زومرفیلد برای پراش از یک روزنه به کمک ما خواهند آمد. به طوری که به تعریف یک سامانه خطی مستقل از مکان خواهیم رسید. آنگاه شرایط رخداد پراش فرنل و پراش فرانهوفر را توضیح خواهیم داد. در ادامه نیز خواص تبدیل فوریه عدسی‌ها و کاربرد آنها در ساخت پردازشگرهای نوری را شرح می‌دهیم. سپس مثال‌هایی از چند پردازشگر نوری ساده را