

فوتونیک

مبانی و کاربردها

تدوین و تألیف:

مهدی زمانی

عضو هیأت علمی دانشکده فیزیک

دانشگاه شهید باهنر کرمان

نیاز دانش

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
پیشگفتار.....	۹
فصل ۱ مبانی اساسی فوتونیک.....	۱۳
۱-۱ مقدمه.....	۱۳
۲-۱ ماهیت موجی نور.....	۱۵
۱-۲-۱ امواج الکترومغناطیسی.....	۱۶
۱-۲-۱-۱ طیف الکترومغناطیسی.....	۱۶
۲-۱-۲-۱ قواعد اساسی.....	۱۷
۳-۱-۲-۱ انرژی، توان و شدت.....	۲۰
۳-۱ قطبش.....	۲۴
۴-۱ سرعت فاز و سرعت گروه.....	۲۷
۵-۱ همدوسی نور.....	۲۸
۱-۵-۱ همدوسی زمانی.....	۲۹
۲-۵-۱ همدوسی فضایی.....	۳۰
۶-۱ تداخل.....	۳۱
۱-۶-۱ مفاهیم اساسی تداخل.....	۳۱
۲-۶-۱ تداخل سنج‌ها.....	۳۳
۳-۶-۱ اهمیت اختلاف فاز در تداخل.....	۳۵
۴-۶-۱ رابطه بین همدوسی و تداخل.....	۳۷
۷-۱ پراش.....	۳۸
۱-۷-۱ پراش میدان-نزدیک و میدان-دور.....	۴۰
۲-۷-۱ پراش و اپتیک فوریه.....	۴۱
۳-۷-۱ وضوح در یک سیستم تصویربرداری نوری.....	۴۴

۴۹	۴-۷-۱ توری پراش
۵۲	۸-۱ اپتیک باریکه‌های گاوسی
۵۴	۹-۱ موجبرها و تارهای نوری
۵۸	۱۰-۱ فوتون‌ها
۵۹	۱-۱۰-۱ ماهیت دوگانه نور
۶۱	۲-۱۰-۱ شار فوتونی

فصل ۲ میکروفوتونیک ۶۳

۶۳	۱-۲ مقدمه
۶۷	۱-۱-۲ محاسبات فوتونیک
۶۸	۲-۱-۲ ساختارهای گاف فوتونی
۶۸	۳-۱-۲ فوتونیک کوانتومی
۶۹	۲-۲ گره فوتونیک
۶۹	۱-۲-۲ میکروپردازنده
۷۱	۲-۲-۲ گره مخابراتی
۷۳	۳-۲-۲ گره میکروفوتونیک
۷۶	۳-۲ سوئیچ کردن نوری
۷۸	۱-۳-۲ سوئیچ کردن تمام-نوری
۸۱	۴-۲ دوپاداری نوری و وسائل
۸۱	۱-۴-۲ دوپاداری نوری
۸۴	۲-۴-۲ مدل اتم دو-ترازه
۸۷	۳-۴-۲ دوپاداری نوری و کامپیوترهای نوری دیجیتال
۸۸	۵-۲ میکروساختارهای فوتونیک
۸۸	۱-۵-۲ بلور فوتونی
۹۱	۱-۱-۵-۲ برخی کاربردهای بلور فوتونی
۹۱	۱-۱-۵-۲ کاربرد موجبری
۹۲	۲-۱-۵-۲ کاربرد به عنوان فیلتر

۹۳	۲-۵-۱-۱-۳ کاربرد در تار نوری
۹۴	۲-۵-۱-۱-۴ مدارهای فعال مبتنی بر بلور فوتونی
۹۴	۲-۵-۱-۱-۵ ادوات نوری بلور فوتونی
۹۵	۲-۵-۲ میکرو حلقه
۹۵	۲-۵-۲-۱ معرفی و فرمولبندی
۱۰۰	۲-۵-۲-۲ کاربرد میکرو حلقه به عنوان فیلتر افزایشنده-کاهنده

فصل ۳ نانوفوتونیک ۱۰۱

۱۰۱	۳-۱ مقدمه
۱۰۲	۳-۲ مبانی نانوفوتونیک
۱۰۴	۳-۲-۱ مبانی نظری
۱۰۶	۳-۳ پلاسمونیک
۱۰۷	۳-۳-۱ خواص نوری فلزات
۱۰۹	۳-۳-۲ پلاسمون پلاریتون‌های سطحی در سطوح مشترک فلز-دی‌الکتریک
۱۱۱	۳-۳-۳ پلاسمون پلاریتون‌های سطحی لایه‌های نازک فلزی

فصل ۴ مگتوفوتونیک ۱۱۵

۱۱۵	۴-۱ مقدمه
۱۱۷	۴-۲ اثرات مگتواپتیکی
۱۱۷	۴-۲-۱ اثر فاراده
۱۱۷	۴-۲-۲ اثر مگتواپتیکی کر
۱۱۸	۴-۳ مواد مغناطیسی
۱۲۰	۴-۴ بلورهای فوتونی مغناطیسی
۱۲۱	۴-۴-۱ بلورهای فوتونی مغناطیسی نوع عبوری
۱۲۳	۴-۴-۲ بلورهای فوتونی مغناطیسی نوع بازتابی
۱۲۳	۴-۵ کاربردهای بلورهای فوتونی مغناطیسی
۱۲۴	۴-۵-۱ ایزولاتورهای مگتواپتیکی

۱۲۷ ۲-۵-۴ حسگرهای مگنتواپتیکی

فصل ۵ لیزر ۱۳۱

۱۳۱ ۱-۵ مقدمه: اصول لیزر

۱۳۱ ۱-۱-۵ برهم‌کنش نور و ماده

۱۳۴ ۲-۱-۵ وارونی جمعیت و تقویت نور

۱۳۹ ۲-۵ مبانی لیزر

۱۴۰ ۱-۲-۵ اجزای اصلی لیزر

۱۴۳ ۲-۲-۵ مبانی تشدیدگر لیزری

۱۴۶ ۳-۲-۵ تقسیم‌بندی لیزرها

۱۴۷ ۳-۵ ویژگی‌های تابش لیزر

۱۴۷ ۱-۳-۵ خواص تابش لیزر

۱۴۹ ۲-۳-۵ پارامترهای تابش لیزر

۱۴۹ ۱-۲-۳-۵ مشخصات فضایی، طول‌موج تولیدی

۱۴۹ ۲-۲-۳-۵ مشخصات زمانی

۱۵۲ ۳-۲-۳-۵ مشخصه‌ی انرژی و توان تابش لیزر

۱۵۳ ۴-۲-۳-۵ ساختار فضایی و واگرایی باریکه‌ی لیزر

۱۵۷ ۵-۲-۳-۵ کانونی‌کردن باریکه‌ی لیزر

فصل ۶ سلول‌های خورشیدی ۱۵۹

۱۵۹ ۱-۶ مقدمه

۱۶۱ ۲-۶ اصول سلول‌های خورشیدی

۱۶۱ ۱-۲-۶ سلول‌های خورشیدی نیمه‌رسانای اتصال p-n

۱۶۹ ۲-۲-۶ سلول‌های خورشیدی آلی

۱۷۵ ۳-۲-۶ سلول‌های خورشیدی ناهم‌پیوندی چندگانه

۱۷۶ ۴-۲-۶ سلول‌های خورشیدی حساس به رنگدانه

۱۷۹ ۵-۲-۶ سلول‌های خورشیدی متوالی

۱۸۲	۳-۶ پیشرفت انواع مختلف سلول‌های خورشیدی
۱۸۲	۱-۳-۶ سلول‌های خورشیدی مبتنی بر سیلیکون بلوری
۱۸۲	۲-۳-۶ سلول‌های خورشیدی مبتنی بر سیلیکون غیربلوری
۱۸۳	۳-۳-۶ سلول‌های خورشیدی مبتنی بر نیمه‌رساناهای III-V
۱۸۴	۴-۳-۶ سلول‌های خورشیدی لایه نازک CIGS
۱۸۵	۵-۳-۶ سلول‌های خورشیدی لایه نازک CdTe
۱۸۵	۶-۳-۶ سلول‌های خورشیدی حساس به رنگدانه
۱۸۶	۷-۳-۶ سلول‌های خورشیدی آلی
۱۸۷	۴-۶ نانوساختارهای ضدبازتابی برای سلول‌های خورشیدی
۱۸۷	۱-۴-۶ لایه نازک ضدبازتابی
۱۸۷	۱-۴-۶ پوشش‌های ضدبازتابی تک-لایه
۱۸۸	۲-۴-۶ پوشش‌های ضدبازتابی چند-لایه
۱۹۰	۲-۴-۶ پوشش ضدبازتابی نانوساختاری
۱۹۰	۱-۲-۴-۶ پوشش‌های ضدبازتابی نانوساختاری همگن
۱۹۱	۲-۲-۴-۶ پوشش‌های ضدبازتابی نانوساختاری ناهمگن
۱۹۶	۳-۲-۴-۶ ترکیب پوشش ضدبازتابی لایه نازک و نانوساختارها
۱۹۷	۳-۴-۶ آینده پوشش‌های ضدبازتابی

فصل ۷ فرامواد..... ۱۹۹

۱۹۹	۱-۷ مقدمه
۲۰۱	۲-۷ شکست منفی، عدسی مسطح و عدسی کامل
۲۰۱	۱-۲-۷ شکست منفی و مواد چپ-دست
۲۰۳	۲-۲-۷ مواد چپ-دست و فرامواد
۲۰۴	۳-۲-۷ چگالی انرژی الکترومغناطیسی در فرامواد
۲۰۵	۴-۲-۷ عدسی مسطح و عدسی کامل
۲۰۹	۳-۷ بلورهای فوتونی و تصویرسازی در ابعاد زیرطول موج
۲۱۱	۴-۷ تشدید، محدودیت‌ها و فرامواد

۲۱۱.....	۱-۴-۷	تحقق گذردهی الکتریکی منفی.....
۲۱۵.....	۲-۴-۷	تحقق تراوایی مغناطیسی منفی.....
۲۱۸.....	۵-۷	فرامواد محیط نامحدود/هذلولوی و هایپرلنز.....
۲۲۲.....	۶-۷	پوشش نامرئی و اپتیک تغییر شکل.....
۲۲۶.....	۷-۷	خلاصه.....
۲۲۹.....		مراجع.....

پیشگفتار

از لحاظ لغوی، عبارت‌های اپتیک و فوتونیک برای توصیف نور ابداع شده‌اند. در واقع، سیر تکامل تمدن بشری دست در دست اپتیک و فوتونیک پیش می‌رود؛ به ویژه با اختراع لیزر، اپتیک و فوتونیک با سرعت بسیار زیاد پیشرفت کرده و به طور قابل ملاحظه‌ای تمدن بشر را تحت تأثیر قرار داده‌اند. امروزه، زندگی روزمره‌ی ما بدون اپتیک و فوتونیک ممکن نیست، تا بدان‌جا که سازمان ملل سال ۲۰۱۵ را به عنوان سال جهانی نور و فناوری‌های مبتنی بر نور نام‌گذاری نمود. خوشبختانه، این امر به ترویج بیشتر فناوری‌های مبتنی بر نور در حل مشکلات جهانی مربوط به انرژی، آموزش، سلامت، کشاورزی، محیط زیست و غیره کمک کرده است. یکی از مؤثرترین راه‌ها برای دستیابی به این اهداف فراهم کردن مفاهیم به روز و قابل اعتماد در مورد این موضوع برای عموم است، که هدف این کتاب است.

کتاب حاضر تعدادی از شاخه‌ها و موضوعات جذاب روز را پوشش می‌دهد که می‌توانند برای تحقیق و توسعه بیشتر مفید باشند. از اینرو، در این کتاب علاوه بر معرفی مفاهیم اساسی فوتونیک، شاخه‌های میکروفوتونیک، نانوفوتونیک، مگتوفوتونیک به همراه موضوعاتی چون لیزر، سلول‌های خورشیدی و فرامواد معرفی خواهند شد.

میکروفوتونیک شاخه‌ای جدید از فناوری است که با توسعه و استفاده از سیستم‌ها و وسایل فوتونیکی کوچک‌شده در ارتباط است. میکروفوتونیک مرحله‌ی اکنون در سیر تکاملی فناوری را ارائه می‌کند که توسط میکروالکترونیک آغاز شد و توسعه‌ی اپتوالکترونیک (الکترونیک نوری) و فوتونیک را به دنبال داشت. میکروفوتونیک شامل طیفی از وسایل، مواد و فرآیندهای جدید از قبیل مدارهای مجتمع فوتونیکی، سیستم‌های میکرواپتیکی، ساختارهای با گاف فوتونی، مواد هوشمند، محاسبات نوری و سیستم‌های فوتونیکی کوانتومی است. وسایل میکروفوتونیکی برای افزایش کارایی سیستم‌های الکترونیکی موجود و برای ارائه عملکرد بیشتر، کوچک سازی و قابلیت اطمینان محصولات تجاری آینده مورد استفاده هستند.

سیستم‌های میکروفوتونیکی آینده کوچک‌تر، سریع‌تر و با بازده انرژی بالاتر خواهند بود. همچنین، کاربردهای میکروفوتونیک می‌توانند در محدوده‌ای از مخابرات، پزشکی، امنیتی و نظامی قرار گیرند.

نانوفوتونیک نیز زمینه تحقیقاتی جدیدی را گشوده است و اجازه می‌دهد تا نور را در مقیاس نانومتر با مشخصه‌هایی دستکاری کرد که ممکن نیست توسط ترکیب فیزیکی و شیمیایی مواد طبیعی یا حد پراش امواج الکترومغناطیس محدود شود. اکنون که کارهای تحقیقاتی بنیادی بسیار جالب منتشر شده‌اند، دانشمندان و مهندسين جستجو برای کاربردهای بالقوه را آغاز کرده‌اند. از جمله این کاربردها می‌توان به نانولیزرهای پلاسمونیک، دیودهای گسیلنده نور نانو ساختار، نانوموجبرهای با اثر نور کُند، فیلم‌های نازک با ضریب شکست منفی، نانوساختارهای ضد بازتاب برای سلول‌های خورشیدی، بیوحسگرهای پلاسمونی با حساسیت بالا و غیره اشاره کرد.

مگنتوفوتونیک به برهم‌کنش نور با مواد مغناطیسی و یا برهم‌کنش نور با مواد در حضور میدان مغناطیسی می‌پردازد. در سال ۱۸۴۵، مایکل فاراده کشف کرد که وقتی یک توده‌ی شیشه در معرض میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، از نظر نوری فعال می‌شود. به عبارت دیگر، این اثر که به اثر فاراده معروف است بیان می‌دارد که در اثر عبور از یک ماده‌ی مغناطیسی، صفحه‌ی قطبش نور می‌چرخد. این اثر ارتباط میان مغناطیس و نور را اثبات کرد و آغاز مگنتوآپتیک را رقم زد. مطالعات پیشگام در زمینه مگنتوفوتونیک بر افزایش یا بهره بردن از پاسخ‌های مگنتوآپتیک مواد و امکان کنترل شار نور توسط میدان‌های مغناطیسی خارجی واقع بودند. از اثرات مگنتوآپتیک می‌توان در طراحی وسایل فوتونیک مبتنی بر مواد مغناطیسی از قبیل ایزولاتورهای مگنتوآپتیک، حسگرهای مگنتوآپتیک و غیره سود برد.

لیزر، که مخفف عبارت تقویت نور توسط گسیل القایی تابش است، وسیله‌ای است که تابش همدوس را در تمام نواحی طیف الکترومغناطیسی شامل مادون قرمز، مرئی و فرابنفش، تولید و تقویت می‌کند. با گذشت بیش از پنجاه سال از اختراع اولین لیزر، لیزرها هنوز به متحیر ساختن ما ادامه می‌دهند و کاربرد آنها در حال گسترش بوده و با پیشرفت فناوری در حال حاضر در بسیاری از جنبه‌های مختلف زندگی روزانه‌ی ما بکار می‌روند. با توجه به اهمیت لیزر در علم فوتونیک، به مبانی و مشخصه‌های لیزرها و چگونگی کارکرد آنها نیز می‌پردازیم.

کاهش منابع انرژی فسیلی و تغییر چشمگیر در شرایط آب و هوایی توجه‌ها را به سوی

منابع انرژی تجدیدپذیر برانگیخته است، در این بین سلول‌های خورشیدی یکی از بهترین انتخاب‌ها هستند. سلول‌های خورشیدی که شامل انواع معدنی و آلی هستند برای دریافت انرژی خورشیدی و تبدیل مستقیم آن به الکتریسیته بکار می‌روند. کتاب حاضر مفاهیم بنیادی عملکرد سلول‌های خورشیدی، همراه با معرفی انواع آنها را ارائه می‌کند تا پایه‌ای برای فناوری حاضر و توسعه‌ی آن در آینده فراهم نماید.

فرامواد ساختارهای مصنوعی هستند که برای کنترل امواج یا میدان‌های الکترومغناطیسی و آکوستیکی طراحی می‌شوند، و ویژگی‌های قابل انتظاری را نمایش می‌دهند که براساس ترکیبات شیمیایی‌شان قابل انتظار نیستند. این ویژگی‌ها منجر به پدیده‌های شگفت‌انگیزی چون شکست منفی، تصویرسازی زیرطول‌موج، و تقویت میدان می‌شوند. در اینجا مرور مختصری روی ویژگی‌های فرامواد و تحقیقات انجام‌شده روی آنها و نیز مسائلی که هنوز نیاز به بررسی و حل دارند، خواهیم داشت.