وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه
گاوازنگ - زنجان

ساخت انبرک نوری چندتله‌ای به روش تمام‌نگاری

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد

الهه یگانگی دستگردی

استاد راهنما: دکتر سید نادر سید ریحانی

آذر ۱۳۸۸

بسم الله الرحمن الرحيم

قدردانی و تشکر

در اینجا بر خود لازم میدانم از استاد و معلم بزرگوارم دکتر سید نادر سید ریحانی بخاطر راهنماییهای ارزشمند و سازنده‌ی ایشان تشکر نمایم.

از خانواده‌ی گرامیم بخصوص پدر و مادرم بدلیل زحمات ارزنده و حمایتهای بی‌دریغشان قدردانی می‌کنم.

همچنین از همسر همراه، مهربان و دلسوزم فرهاد، که همواره مشوق و حامی من بوده نهایت سپاسگزاری را دارم.

از آقایان رسول عالی‌پور و دکتر علیرضا مرادی بدلیل راهنمایی‌هایشان در انجام این پروژه سپاسگزارم.

چکیده

انبرک نوری یک باریکه‌ی لیزر گاوسی است که با استفاده از عدسی شیئی میکروسکوپ کانونی شده و می‌تواند به ذراتی که در مجاورت کانون قرار گرفته‌اند نیروی بازگرداننده‌ای به سمت کانون وارد کند. این ابزار توانایی اعمال نیروهایی در محدوده‌ی چند فمتونیوتن تا چند صد پیکونیوتن را دارد. بواسطه‌ی این محدوده‌ی نیرو، انبرک نوری کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف علوم زیستی پیدا کرده است. با توجه به کاربردهای روز افزون انبرک نوری، این ابزار دستخوش پیشرفتهای بسیاری شده که مهمترین آنها ایجاد انبرک‌های نوری چندگانه است که در آن باریکه لیزر بجای کانونی شدن در یک نقطه به عنوان یک تله در چند نقطه کانونی می‌شود که در حقیقت آرایه‌ای از تله‌ها هستند. در سالهای اخیر چندین رهیافت جهت ایجاد انبرکهای نوری چندگانه ارائه شده است که یکی از پرکاربردترین آنها ایجاد تله نوری چندگانه به روش تمام‌نگاری است. اخیراً بدلیل استفاده از SLM که ابزاری مبتنی بر کریستال مایع است، امکان تغییر و کنترل سه بعدی تله‌ها بصورت دینامیک نیز وجود دارد. قابلیت دینامیک بودن SLMها به دلیل آدرس‌دهی کامپیوتری ساختارِ پیکسل مانند این ابزار است، که می‌تواند در جاهای مختلفِ جبهه‌ی نور گذرنده از SLMها، اختلاف راه‌های نوری متفاوت ایجاد کند و در نتیجه شکل جبهه موج به اشکال دلخواه قابل تغییر خواهد بود.

از آنجا که قصد ما در آزمایشگاه انبرک نوری ایجاد تله‌های نوری چندگانه به روش تمام‌نگاری بود، وجود SLM ضروری بنظر می‌رسید. با توجه به قیمت بالای این قطعه، خریداری آن در آزمایشگاه انبرک نوری برای ما مقدور نبود. ایده‌ی اصلی که در این پایان نامه برای ایجاد تله‌های چندگانه به روش تمام‌نگاری بکار گرفته‌شد استفاده از LCD های یک ویدئو پروژکتور بجای SLM بود. از آنجا که LCDهای ویدئو پروژکتور مانند SLM از کریستال مایع تشکیل شده‌اند، باید رفتارهای مشابهی نسبت به اعمال ولتاژ داشته باشند که البته این رفتار نیز با توجه به نوع کریستال مایع بکار رفته در هریک از این دو قطعه، ممکن است اندکی متفاوت باشد، (دسته‌بندی‌های کریستال‌های مایع در فصل ۳ توضیح داده شده است). برای اطمینان از اینکه LCD ویدئو پروژکتور چه مقدار اختلاف راه برای باریکه نوری ایجاد می‌کند از یک تداخل‌سنج ماخ زندر استفاده شد. ویدئو پروژکتور شامل سه LCD مربوط به سه طول موج در ناحیه قرمز، آبی و سبز است. با ایجاد تغییر در مدارهای

ویدئو پروژکتور توانستیم هر سه LCD را خارج نموده و هریک از آنها را بطوریکه اتصال آن از مدار خود قطع نشده باشد در یکی از بازوهای تداخل‌سنج قرار دهیم. میزان اختلاف ولتاژ ایجاد شده در هریک از پیکسل‌های LCD متناسب با میزان درجه خاکستری است که با استفاده از رایانه به آن اعمال می‌شود. همچنین در کریستال مایع با توجه به ولتاژ اعمال شده ضریب شکست و در نتیجه اختلاف فاز تغییر می‌کند. این بدان معنی است که با استفاده از رایانه و اعمال الگوهای با درجات مختلف خاکستری به هریک از پیکسل‌ها می‌توان اختلاف راه‌های نوری مختلفی را برای نور عبوری از آن ایجاد کرد. این کار برای هر سه LCD و با دو منبع نوری لیزری با طول موج‌های ۵۳۲ نانومتر و ۱۰۶۴ نانومتر انجام شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که برای تله‌اندازی نمونه‌های زیستی، LCD قرمز با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر و برای نمونه‌های غیر زیستی LCD سبز با طول موج ۵۳۲ نانومتر بهترین گزینه‌ها هستند. در حال حاضر نتایج بدست آمده در آزمایشگاه انبرک نوری مورد استفاده قرار گرفته و LCDهای مورد نظر در چیدمان انبرک نوری چندگانه بکار گرفته شده است.

فهرست

چکیده . . . . . چهار

۱ پیشگفتار

۱.۱ مقدمه‌ای بر انبرک نوری ۱

۲.۱ تاریخچه ۲

۳.۱ ساختار پایان نامه ٦

۲ اپتیک پراشی

۱.۲ از پراش تا اپتیک پراشی ۷

۱.۱.۲ پراش ۹

۲.۱.۲ اپتیک فوریه ۱۱

۳.۱.۲ اپتیک پراشی ۱۱

۴.۱.۲ تحریرکننده‌های فضایی کریستال مایع (SLM) ۱۴

۵.۱.۲ پراش فرانهوفر ۱۴
۲.۲ تمام‌نگاری ۱۵
۱.۲.۲ مبانی نظری ۱۶

۳ انبرک‌های نوری

۱.۳ انبرک‌های نوری تک تله ۲۱
۱.۱.۳ رژیم اپتیک هندسی ۲۲
۲.۱.۳ رژیم رایلی ۲۶
۲.۳ چیدمان انبرک نوری ۲۸
۱.۲.۳ لیزر ۲۸
۲.۲.۳ عدسی شیئی ۳۰
۳.۲.۳ عدسی چگالنده (کاندنسور) ۳۱
۴.۲.۳ فوتودیود ۳۱
۳.۳ انبرک نوری چندگانه ۳۳
۴.۳ انبرک‌های نوری چندگانه به روش تمام‌نگاری ۳۴
۱.۴.۳ روش فوریه ($4F$) برای چیدمان انبرک نوری چندگانه به روش تمام‌نگاری : . . ۳۴
۲.۴.۳ روش فرنل برای چیدمان انبرک نوری چندگانه به روش تمام‌نگاری ۳۶

۴ نحوه‌ی ساخت یک SLM ارزان قیمت

۱.۴ مدوله‌سازی فاز و مدوله‌کننده‌های نوری کریستال مایع ۳۸

۱.۱.۴ کریستالهای مایع ۳۹
۲.۱.۴ خواص اپتیکی کریستالهای مایع تک محوری ۴۰
۳.۱.۴ تغییر شکل کریستالهای مایع نماتیک با اعمال میدان خارجی ۴۱
۴.۱.۴ بستگی مدوله‌سازی نور به قطبش نور فرودی ۴۳
۲.۴ شرح کارهای تجربی ۴۴
۳.۴ تداخل سنجی ۴۷
۱.۳.۴ مشخصه‌یابی LCDها ۴۸
۴.۴ تحلیل فریزهای تداخلی ۶۲
۱.۴.۴ خطای آزمایش: ۶۶

۵ ساخت انبرک نوری چندگانه به روش تمام‌نگاری

۱.۵ تحلیل نتایج آزمایشات ۶۹
۱.۱.۵ چیدمان انبرک نوری چندگانه به روش تمام‌نگاری با استفاده از LCD ۷۰
پیوست الف ۷۵
مراجع ۷۷

فصل اول

پیشگفتار

۱.۱ مقدمه‌ای بر انبرک نوری

انبرک نوری معمولاً از باریکه لیزر گاوسی که توسط یک عدسی شیئی با گشودگی زیاد کانونی شده است. زمانیکه ذرات شفاف دی الکتریک نزدیک این کانون قرار می‌گیرند نیرویی بر آنها وارد می‌شود که از انتقال تکانه از طرف فوتون‌های فرودی ناشی می‌شود. این نیروها می‌توانند در فضا یک تله سه بعدی پایدار ایجاد نمایند، و با اعمال نیروهایی از مرتبه پیکو نیوتن به ذرات میکرو ـ نانومتری آنها را در تله نگه دارند. دستگاه انبرک نوری دارای کاربردهای بسیاری در علوم زیستی، اپتیک و مکانیک و ... می‌باشد. از کاربردهای این ابزار در علوم زیستی می‌توان به نگه داشتن باکتریها و اندازه‌گیری سرعت شنای میتوکندری [۱]، اندازه‌گیری انعطاف پذیری تاژک باکتری [۲]، مشاهده مستقیم قدمهای کاینزین به طول ۸ نانومتر [۳]، مطالعه جابجایی و نیروی ناشی از برهم‌کنش اکتین[۱] با میوزین[۲] [۴]، بررسی خواص و کشسانی پلیمرهای زیست

[۱] $Actin$

[۲] $Myosin$

شناختی مانند مولکول DNA [۵و۶] و ... نام برد. همچنین در فیزیک اتمی می‌توان به کاربردهایی از جمله سرمایش اتمها با استفاده از فواره اتمی[۳] [۷] و دستیابی به چگالش بوز—انیشتین در بخارهای اتمی [۸] اشاره نمود.

۲.۱ تاریخچه

نور با وجود نداشتن جرم حامل تکانه است. اولین مشاهدات علمی که نشان می‌داد نور به اجسام جامد نیرو وارد می‌کند در حدود ۴۰۰ سال پیش توسط کپلر[۴] بود. وی مشاهده کرد که دم ستاره های دنباله‌دار به سمتی دور از خورشید منحرف می‌شوند و این را با اعمال نیرو از طرف نور خورشید توجیه کرد. بعدها ماکسول[۵] نشان داد که شار تکانه در باریکه نور متناسب با شدت نور است و می تواند به اجسام منتقل شده و منجر به فشار تابشی به ذره و حرکت آن در راستای انتشار نور شود[۹]. اما از آنجا که تکانه‌ای که توسط فوتون‌ها حمل می‌شود کوچک است، نیروهای مطابق با این تکانه نیز کوچک هستند. شدت نوری که توسط خورشید بواسطه فشار نور ایجاد می‌گردد تنها در قسمتی از فضا که گرانش و اصطکاک قابل چشمپوشی هستند مشاهده پذیر است. این نیروهای پیکونیوتنی می‌توانند به ذرات بسیار کوچک شتاب وارد کنند. طبق قانون دوم نیوتن $a = F/m$ می‌بینیم که به یک ذره پلی‌استیرن به جرم $5 \times 10^{-16} Kg$، شتابی از مرتبه‌ی $1000 m/s^2$ وارد می‌شود. به بیان دیگر در مقیاسهای میکرو و نانومتر منابع لیزرهای معمول منابع خوبی برای دستکاری ذرات هستند و قادرند نیروهای متناسب با این مقیاسها را ایجاد کنند.

بدین ترتیب بعد از اختراع لیزر، فشار تابشی مورد توجه فراوانی قرار گرفت. ایده‌ی تله‌اندازی ذرات اولین بار توسط آرتور اشکین [۶] بررسی شد. در سال ۱۹۶۹ وی مقاله‌ای منتشر کرد که نشان می‌داد چگونه فشار تابشی می‌تواند برای شتاب دادن و تله‌اندازی ذرات دی‌الکتریک با ابعاد میکرون استفاده شود. در این مقاله یک باریکه‌ی لیزر با مد عرضی TEM_{00} به یک کره شیشه‌ای در جهت انتشار نور شتاب می‌داد و کره همزمان

[۳] $atomic\ fountain$

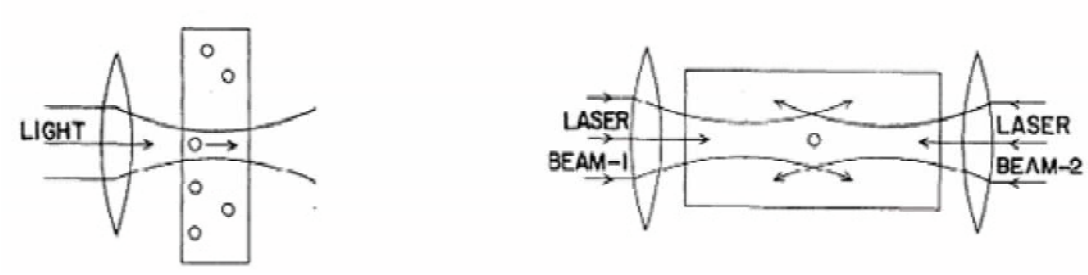
[۴] Kepler

[۵] $Maxwell$

[۶] A.Ashkin

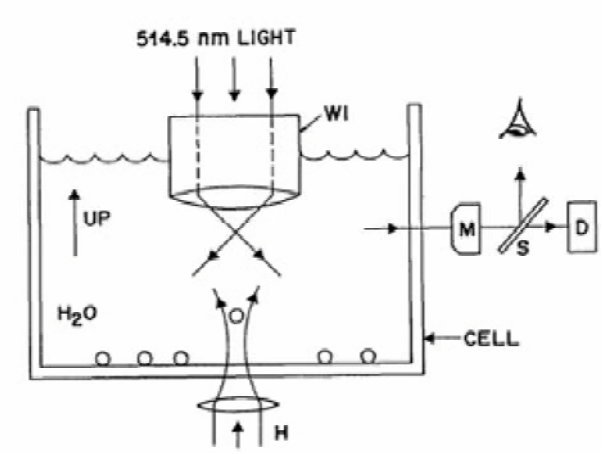
بصورت عرضی به سمت مرکز باریکه حرکت می‌کرد. بعدها وی نیرویی را که موجب این حرکت عرضی می‌شد را نیروی گرادیانی نامید.

در سال ۱۹۷۰ اشکین با تاباندن دو باریکه‌ی لیزر مشابه و در خلاف جهت به یک ذره توانست حرکت ذره را کنترل نموده و ذره را در سه بعد به تله بیاندازد (شکل ۱—۱). در این آزمایش وقتی کره‌ی میکرونی بر روی محور مشترک باریکه قرار می‌گرفت نیروی پراکندگی ناشی از دو باریکه که با هم مساوی و در خلاف جهت هم بودند همدیگر را حذف می‌کردند و نیروی گرادیانی باریکه‌ها، موجب ماندن کره بر روی محور مشترک باریکه‌ها می‌شد [۱۰].



شکل ۱—۱اولین و دومین چیدمان اشکین برای تله‌اندازی ذرات [۱۰].

در سال ۱۹۷۱ اشکین آزمایش تله‌ی شناوری را انجام داد. در این آزمایش کره‌های دی‌الکتریک شفاف کوچک بطور پایدار توسط نیروهای فشار تابشی یک تک باریکه لیزر با مد عرضی TEM_{00} در راستای قائم و رو به بالا در هوا و در خلأ معلق نگه داشته شد [۱۱]. در سال ۱۹۸٦ اشکین در معروف‌ترین آزمایش خود نشان داد که ذرات را می‌توان توسط یک تک باریکه لیزر به تله انداخت [۱۲]. وی با کانونی کردن باریکه لیزر با مد عرضی TEM_{00} توانست علاوه بر گرادیان عرضی شدت که خاصیت ذاتی این باریکه است، گرادیان شدت محوری ایجاد کند و توانست کره های دی الکتریک با قطرهای $25nm$ تا $10\mu m$ رادر سه بعد بدون نیاز به لیزر دوم به تله بیاندازد. چنین تله نوری به انبرک نوری معروف شد.



شکل ۱ — ۲اولین تله نوری که در سال ۱۹۸٦ توسط اشکین چیده شد[۱۲] .

در فیزیک مطالعه‌ی پدیده‌هایی با ابعاد میکروسکوپی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است . از آنجا که تله‌های نوری قادر بودند ذرات کوچک (ابعاد میکرومتر تا چندین نانومتر) را به تله بیاندازند،موجبات رشد این ابزار فراهم شد و کاربردهای بسیاری در زیست شناسی سلولی و مولکولی پیدا کرد. نیاز به ایجاد چندین تله همزمان و کنترل سه بعدی تله‌ها انبرک‌های نوری تک تله‌ای را به سمت انبرک های نوری چند تله‌ای سوق داد. از سال ۱۹۹۵ روشهایی برای ایجاد تله‌های چندگانه پیشنهاد شد.

انواع روشهای تولید چند تله‌ای عبارتند از: ۱) روش ترکیب تک باریکه‌ای ۲) روش جاروب کردن باریکه لیزر ۳) روشهای تمام نگاری

یکی از بهترین کارهایی که با استفاده از روش ترکیب تک باریکه‌ی لیزر صورت گرفته است توسط «فالمن و اکسنر» [۷] در سال ۱۹۹۷ انجام شد که در آن یک باریکه لیزر به دو باریکه مجزا تقسیم شده است، این دو باریکه با عبور از عدسی شیئی میکروسکوپ جمع شده و دو کانون مستقل در صفحه‌ی کانونی عدسی شیئی میکروسکوپ ایجاد می‌شود و بنابراین با این روش یک تله نوری دو باریکه‌ای تشکیل شد.

روشهایی که بر مبنای جاروب کردن باریکه لیزر انجام می‌گیرند از منحرف کننده‌های صوتی—نوری AOD استفاده می‌کنند [۱۳] و می‌توانند نور را از نقطه‌ای به نقطه دیگر با فرکانس کیلوهرتز جابجا کنند. در واقع زمان

[۷] $Fallman, Axner$

بین دو نوردهی آنقدر کم است که ذره‌ی به تله افتاده نبودن نور را احساس ننماید. اندازه شدت در هر نقطه‌ی تله(نیروی وارده) را می‌توان با تغییر زمان نوردهی کم و زیاد نمود. تغییر سریع محل باریکه لیزر با استفاده از AOD دو محوره انجام می‌شود. با اینکه روش جاروب کردن بسیار ساده و انعطاف پذیر بود، اما از آنجا که با تقسیم زمانی نور از نقطه‌ای به نقطه دیگر همراه بود بصورت زمان واقعی قابل اجرا نبود. این روش در سال ۲۰۰۴ توسط «ووسن» [۸] در دو بعد بصورت دینامیک انجام شد [۱۴].

از آنجا که هولوگرامها (تمام‌نگاشت‌ها) قابلیت ایجاد تصاویر سه بعدی را دارند برای دستیابی به کنترل سه بعدی تله‌های چندگانه باید از روشهای هولوگرافی استفاده می‌شد. پیشگام انبرکهای نوری چندتله‌ای به روش تمام‌نگاری «فورنیر» [۹] بود که در سال ۱۹۹۵ با استفاده از هولوگرامهای شیشه‌ای ایستا باریکه‌ی نور را در چندین مکان کانونی کرد [۱۵]. پس از آن «گریر» [۱۰]با استفاده از هولوگرامهایی که روی شیشه نقش می‌بست سعی در ایجاد تله‌های چندگانه‌ی دینامیک نمود. قدم بعدی استفاده از ابزارهایی با قابلیت تغییر دینامیک (مدوله کننده‌های فضایی فاز، SLM) بود. این ابزارها که از کریستالهای مایع تشکیل می‌شوند، نور لیزر را طبق هولوگرامی که بر آنها نقش بسته پراشیده نموده و آرایه‌های دلخواهی از تله‌ها را ایجاد می‌نمایند. پیشگام این کار نیز گروه «تیزانی» [۱۱] بود [۱۷و۱۶]. کار این گروه در مورد چگونگی کنترل هولوگرامها توسط کامپیوتر برای ایجاد آرایه‌ای از تله‌ها بود که بتوان آنها را بصورت زمان واقعی در سه بعد کنترل کرد. در پی این کار «گریر» در مقاله‌ای با عنوان «انبرکهای نوری تمام‌نگاری دینامیک» [۱۲] با استفاده از الگوریتم‌های تکرار، روشی برای بهبود آرایه‌ی پیچیده‌ای از تله‌ها و افزایش تعداد تله‌ها ارائه داد. از آن پس تاکنون روشهای دیگری نیز برای بهبود کیفیت تله‌ها، افزایش تعداد تله‌ها و کوتاه کردن زمان محاسبات الگوریتم‌ها ارائه شده است.

تاکنون دو جایزه نوبل به کاربردهای تله‌اندازی نوری اعطا گردیده است: جایزه نوبل فیزیک سال ۱۹۹۷ به

---

[۸] $Vossen$

[۹] $Fournier$

[۱۰] $DavidGreier$

[۱۱] $Tizani$

[۱۲] $Dynamic\ holographic\ optical\ tweezers$

«چو»[۱۳]،«کوهن—تانوجی»[۱۴] و «فیلیپس»[۱۵] برای توسعه سرمایش و تله‌اندازی اتمها با نور لیزر اعطا شد. در سال ۲۰۰۱ جایزه نوبل دیگری در فیزیک به «کرنل»[۱۶]، «کترل»[۱۷] و «ویمن»[۱۸] برای دستیابی به BEC در گازهای رقیق از اتمهای قلیایی و مطالعات اساسی در مورد خصوصیات چگالش اعطا شد.

در ایران چیدمان انبرک نوری تک‌تله برای اولین بار در دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان در سال ۱۳۸۰ توسط دکتر سید نادر سید ریحانی و با نظارت دکتر رامین گلستانیان و دکتر حمیدرضا خالصی‌فرد ساخته شد. در سالهای اخیر از این انبرک نوری برای انجام آزمایشها و پایان‌نامه‌های مختلف در راستای بهینه‌سازی این چیدمان و کاربردهای زیستی آن استفاده شده است.

۳.۱ ساختار پایان نامه

از آنجا که اساس کار انبرک‌های نوری چندگانه به روش تمام‌نگاری بر مبنای پراش می‌باشد، در فصل دوم در مورد اپتیک پراشی، پراش و تمام نگاری بحث خواهیم کرد. در فصل سوم توضیحات نسبتاً مفصلی در مورد انبرک نوری و نظریه‌های حاکم بر آن، شرح اجزای تشکیل دهنده‌ی چیدمان انبرک نوری تک‌تله و سپس چندگانه ارائه شده است. همان‌طور که در پایان نامه شرح داده خواهد شد، جزئی که در انبرک نوری چندتله‌ای به روش تمام‌نگاری وظیفه‌ی دینامیک‌سازی تله‌ها را بر عهده دارد SLM است و هدف این پایان‌نامه سعی بر ایجاد چنین قطعه‌ای با همین کارایی ولی با قیمت پایین‌تر است، در فصل سوم به مطالعه‌ی چگونگی رفتار این قطعه، نحوه‌ی ساخت این قطعه و شرح کارهای آزمایشی و ارائه‌ی نتایج تجربی بدست آمده از آزمایشات خواهیم پرداخت. در فصل پنجم با استفاده از نتایجی که در فصل چهارم ذکر شده‌اند به توضیحاتی راجع به بکارگیری SLM ساخته شده برای ایجاد تله نوری چندگانه می‌پردازیم.

---

[۱۳] $StevenChu$

[۱۴] $Cohen-Tannoudji$

[۱۵] $Philips$

[۱۶] $Cornell$

[۱۷] $Ketterle$

[۱۸] $Wieman$

فصل دوم

اپتیک پراشی

۱.۲ از پراش تا اپتیک پراشی

ابزارهای اپتیکی در ابتدا به‌منظور افزایش گستره‌ی دید بشر اختراع شدند و تکامل یافتند: برای دیدن جزئیات اشیاء بسیار ریز و یا مشاهده‌ی اجرامی که در فواصل دور با چشم غیر مسلح قابل رؤیت نبود. این ابزارها معمولاً بر مبنای بازتاب و شکست نور استوارند و پدیده‌های پراش و پراکندگی به عنوان پدیده‌های نامطلوب در این حوزه بحساب می‌آیند. شناخت بیشتر و مدل‌سازی پدیده‌ی پراش منجر به ساخت توریهای پراش و کاربردهای آن در طیف‌سنجی و تکنولوژی‌های دیگر گردید.

قدم بعدی در شکوفایی پدیده‌ی پراش، هولوگرافی (تمام‌نگاری) بود. که ریشه‌ی آن از کلمه‌ی «نوشتن کامل»[۱] از یونان باستان بوده است. در تمام‌نگاری ثبت اطلاعات با پدیده‌ی تداخل صورت می‌گیرد و بازسازی تصویر با پراش نور از توزیع نقش فریزهای تداخلی ثبت شده انجام می‌گیرد. هر چند به‌دلیل نقص ابزارهای اپتیکی بکار رفته همواره در ثبت و بازسازی تصویر مقادیری از نوفه نیز وجود دارد.

[۱] *complete writing*

تمام‌نگاری در شاخه‌ی پردازش جبهه موج مورد توجه زیادی قرار گرفته است. عدسی‌ها، منشورها، آینه‌ها و دیگر ابزارهای شکستی و بازتابی نور همگی پردازشگرهای جبهه‌موج هستند که موارد کاربرد محدودی دارند. به عنوان مثال لنزهای شکستی نور تنها قادرند جبهه موج نور را با توابعی ساده طوری تغییر دهند که نور بطور متقارن به محور عدسی نزدیک یا از آن دور شود.

پیشرفتهای بعدی قطعات نوری تمام نگاری (HOE[۲]) نشان داد که پردازش جبهه‌موج نور می‌تواند توابع پیچیده‌تری را نیز شامل گردد. نمایشگرهای تمام‌نگار سرسو (HUD[۳]) از جمله HOE هایی هستند که پتانسیل بالایی در پردازش جبهه‌موج دارند. هر چند HOE های مربوط به HUD ها با وجود نوآوریهای زیادی که در زمینه‌ی نمایشگر داشته‌اند باز هم فرایندهای مربوط به فرایندهای آنالوگ، عیبی اساسی برای آنها بشمار می‌آید. بطوریکه حتی اگر این ابزارها بطور پایه‌ای با استفاده از CAD[۴]های اپتیکی بهینه شوند باز هم ثبت و نگاشت HOE ها محدودیتهای بسیاری را از خود نشان می‌دهند. برای غلبه بر این محدودیت مفهومی پیدا شد که با استفاده از آن الگوهای پراش مورد نیاز برای ایجاد جبهه موجهای دلخواه دیگر با استفاده از تداخل ثبت نمی‌شوند بلکه بصورت مستقیم ثبت می‌گردند تا با استفاده از آن الگوهای مناسبی برای ثبت جبهه موجهای پیچیده بدست آورند. برای رسیدن به هدف لازم است تصویر درستی از الگوی مورد نظر داشته باشیم. همچنین لازم است چگونگی مدل‌سازی و گسترش روشهای جدید برای میکرو—ساختارها که بتوان توسط آنها قطعات پراشی ایجاد کرد مد نظر قرار گیرد. این روشها موسوم به روشهای دیجیتالی یا رقمی‌اند.

در سالهای ۱۹۷۰—۱۹۶۰ تلاشهای بسیاری در این زمینه انجام گرفت که بدلیل امکان‌پذیر نبودن فرآوری و بهینه‌سازی مواد جهت مدوله سازی، این تلاشها بی‌ثمر بود. یکی از مؤثرترین قدمهایی که باعث پیشرفت در این زمینه شد بوجود آمدن مهارتهای بیشتر در زمینه‌ی پردازش و پرداخت مواد و نیز روشهای مربوط به CAM/CAD[۵] که باعث گذار از میکرو—الکترونیک به میکرو—اپتیک شد. نتایج آن باعث پیشرفتهای شگرفی برای رسیدن به هدفهای اولیه شد که همان طراحی و ساخت قطعات مورد نیاز برای ایجاد و تحلیل جبهه

[۲] *Holographic Optical Element*

[۳] *Holographic head up display*

[۴] *Computer aided design*

[۵] *Computer aided manufacturing*

موجهای دلخواه شد. روشهای CAM/CAD و همچنین تکنولوژی پرداخت مواد دقیقاً مثل همان چیزی است که در ابتدا برای پیشرفت میکرو–الکترونیک رخ داد و به همین دلیل سازگاری بسیار بالایی پیدا کردند تا میکرو–اپتو–الکترونیک را گسترش دهند [۱۸].

۱.۱.۲ پراش

اولین بار فرانچسکو گریمالدی(۱۶۶۳–۱۶۱۸) متوجه ساختار ریز در لبه‌ی سایه‌ها شد که با انتشار نور به خط مستقیم قابل توجیه نبود [۱۹]. این خمیدگی امواج نور حول لبه‌های یک مانع را بعداً پراش نامیدند. در محدوده‌ی تقریبی که با اپتیک هندسی نمایش داده می‌شود، نور بنا به فرض در امتداد خط راست از چشمه دور می‌شود. بنابراین، پرتو صرفاً مسیر انتقال انرژی نوری از یک نقطه به نقطه‌ی دیگر در دستگاه اپتیکی است. یک باریکه‌ی لیزر با عرض کم شاید بهترین تقریب عملی برای پرتو نور باشد. اما وقتی روزنه‌ای که نور از آن عبور می‌کند از یک حدی کوچکتر شود حتی باریکه لیزر نیز پراشیده می‌شود.

اولین قدم برای توجیه مشاهده‌های گریمالدی توسط هویگنس، فیزیکدان هلندی، در سال ۱۶۷۸ برداشته شد که در فرضیه معروف خود : هر نقطه از سطح پیشین یک آشفتگی موجی ـجبهه موج ـرا می‌توان یک چشمه ثانوی برای امواج کروی (یا موجکها) در نظر گرفت که اینها نیز با سرعت نور در محیط پیش می‌روند و پوش آنها جبهه موج جدید در زمان بعدی را تشکیل می‌دهد، را بیان کرد [۲۰]. به بیان دیگر هر میدان موج از تقسیم یا ترکیب موجکهای کروی تشکیل شده است. هویگنس توانست فرضیه خود را برای اثبات قوانین بازتاب و شکست بکار برد. فرنل (۱۸۲۷–۱۷۸۸) با بهره‌گیری از نظریه موجی نور و با تلفیق نظریات هویگنس و یانگ، اصل هویگنس را ارتقا داد و بدینوسیله قادر به توصیف پراش از لبه‌های مستقیم و روزنه‌ها شد. ماکسول (۱۸۷۹–۱۸۳۱) در سال ۱۸۶۰ در یک گام مهم نشان داد که نور یک موج الکترومغناطیس است. اما تا سال ۱۸۸۲ که نظریات هویگنس و فرنل توسط کیرشهف(۱۸۸۷–۱۸۲۴) بر مبنای یک ریاضیات مستحکم پایه ریزی شد پیشرفتی حاصل نشد. کیرشهف موفق شد که نشان دهد که دامنه‌ها و فازهای توصیف شده توسط فرنل

برای منابع ثانویه در حقیقت یک نتیجه منطقی از طبیعت موجی نور است [۲۱]. هنگامیکه کیرشهف نظریه پراش را بر اصول ریاضی پایه‌ریزی کرد، ضریب میل بصورت کاملا طبیعی در معادلات ظاهر شد. کیرشهف فرمول‌بندی خودش را بر دو فرض درباره‌ی مقادیر مرزی نور تابیده شده روی سطح مانعی که در مسیر انتشار نور قرار گرفته است، پایه ریزی کرد. اگرچه بعداً پوانکاره در سال ۱۸۲۹ و سامرفیلد[۶] در سال ۱۸۹۴ نشان دادند که این فرض‌ها با یکدیگر ناسازگارند. بنابراین با توجه به ایرادهای وارد شده باید نتیجه‌گیری کرد که فرمول بندی کیرشهف از اصل هویگنس—فرنل را باید به عنوان یک تقریب در نظر گرفت. اما معلوم شده است که در اغلب شرایط، نتایج فرمول بندی کیرشهف به طرز عجیبی در تطابق خوبی با تجربه است. نظریه کیرشهف توسط سامرفیلد و با بهره‌گیری از توابع گرین، اصلاح گردید. نظریه‌ی جدید تحت عنوان نظریه پراش «ریلی—سامرفیلد» شناخته شد.

ازنظر سامرفیلد « هر انحراف نور از مسیر مستقیم که بازتاب یا شکست نباشد را پراش می‌نامند» [۲۲]. پراش به علت محدودیت عرضی روی موج ایجاد می‌شود که البته مانع ایجاد کننده این محدودیت باید قابل مقایسه با طول موج باشد. همچنین پراش نباید با اثر نیمسایه که در اثر تابش یک چشمه نور غیر نقطه‌ای به یک مانع کدر با ابعاد محدود صورت می‌گیرد اشتباه شود. از طرفی چون تداخل بر اساس برهم نهی دو یا چند جبهه موج استوار است، با پراش که در اثر محدود شدن بخشی از یک جبهه موج توسط جسم کدر یا شفاف بوجود می‌آید، متفاوت است.

در اینجا باید بر این نکته تأکید شود که نظریه کیرشهف و ریلی — سامرفیلد مشترکاً از ساده‌سازیها و تقریبهائی عمده استفاده می‌کنند که مهمترین آنها چشمپوشی از طبیعت برداری میدانهای الکترومغناطیسی و در نظر گرفتن آن به صورت یک پدیده اسکالر است.[۲۴و۲۳]

---

[۶] *Sommerfeld*

۲.۱.۲ اپتیک فوریه

تبدیل فوریه، یک ابزار ریاضی فراگیر و قدرتمند است که کاربردهای بسیاری در حوزه‌های متنوعی از فیزیک و مهندسی پیدا کرده است. بنیانهای این روش توسط ریاضیدان فرانسوی، فوریه(۱۸۳۰–۱۷۶۸) پایه‌ریزی شد. کاربردهای آن در اپتیک عمدتاً مربوط به مباحث پراش، فرایند پردازش اطلاعات اپتیکی، تحلیل کیفیت دستگاههای اپتیکی و تمام نگاری است. همچنین از اپتیک فوریه می‌توان اپتیک هندسی را نتیجه گرفت. بنابراین تمام پدیده‌های اپتیک هندسی از اپتیک فوریه قابل استخراج است، بعلاوه بسیاری از خصوصیات دستگاههای اپتیکی را فقط با اپتیک فوریه می‌توان تحلیل کرد.

۳.۱.۲ اپتیک پراشی

علیرغم پیشینه‌ی طولانی پراش در علم اپتیک، تا اواسط قرن بیستم میلادی توریهای پراشی، تنها ابزار با اهمیت اپتیک کلاسیک و از ملزومات اجتناب ناپذیر طیف‌سنجی بود که بجای شکست و بازتاب از پدیده‌ی پراش برای کنترل انتشار امواج الکترومغناطیس بهره گرفت.

در سال ۱۹۴۸ گابور، دانشمند انگلیسی، در یک فرایند بدیع و دو مرحله‌ای، تصویر سازی بدون استفاده از عدسی را که خود آن را بازسازی جبهه موج نامگذاری کرد مطرح ساخت و جایزه نوبل سال ۱۹۷۱ را به خود اختصاص داد. این روش اکنون به هولوگرافی یا تمام‌نگاری موسوم است، زیرا قادر است تمام اطلاعات یک جسم را ثبت نماید، بدین معنی که در این فرایند امکان ثبت همزمان فاز و دامنه‌ی امواج پراشیده از جسم وجود دارد. علیرغم اینکه با استفاده از فیلم عکاسی فقط می‌توان به ثبت شدت نور پرداخت. بدین ترتیب تغییر شکل دلخواه جبهه موج با کمک ریز ساختارهای اپتیکی که بوسیله تمام نگاری ایجاد شده بود فراهم گردید. در اواسط دهه شصت میلادی، لوهمن دریافت که تمام نگارهای اپتیکی را می‌توان بوسیله ترادیدهای دوتایی عددی[۷] شبیه سازی کرد و این امر گام مهم دیگری به سمت استفاده از پراش در اپتیک بود. اما برای استفاده کامل از روش مذکور اندکی زمان لازم بود تا اینکه پس از پیدایش کامپیوترها و روشهای عددی قدرتمند، تکنیک ساخت

[۷] *numerical binary transparents*

میکرولیتوگرافی محقق گردد.

تفکر اصلی در کنترل جبهه موج حاصل از پراش با توجه به پیشرفتهای بدست آمده تا چند دهه‌ی قبل، دانشمندان را به سمت شاخه‌ای جدید از اپتیک فیزیکی هدایت کرد که اکنون به اپتیک پراشی موسوم است و دارای کاربردهای تکنیکی فراوان می‌باشد. بنابراین وجه تمایز اپتیک پراشی و اپتیک فیزیکی، در تولید و کنترل جبهه‌های موج با استفاده از تقسیم جبهه موج اولیه و هدایت آنها با بکارگیری تداخل و کنترل فاز می‌باشد.

هنگامیکه بحث از کنترل جبهه موج نور حاصل از پراش به میان می آید با عبارتهای زیر مواجه می‌شویم:

قطعات اپتیکی پراشی (DOE)[۸]

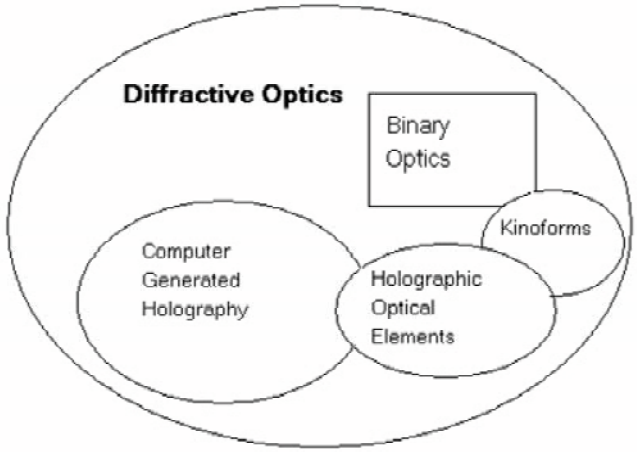
کینوفرم‌ها$(kinoforms)$

اپتیک دو بیتی $(Binaryoptics)$

تمام‌نگاری ساخت رایانه (CGH)[۹]:قطعات اپتیکی پراشی‌اند که یک الگوی تداخلی محاسبه شده را به رشته‌ای از ماسکهای دامنه‌ای یا فازی تبدیل می‌کند

قطعه اپتیکی تمام نگار (HOE)[۱۰]

برای فهم چگونگی ارتباط این موارد نموداری در زیر آورده شده است:



شکل ۲—۱چگونگی ارتباط عناصر اپتیک پراشی.

[۸] $diffractive\ optical\ element$

[۹] $computer\ generated\ hologram$

[۱۰] $holographic\ optical\ element$