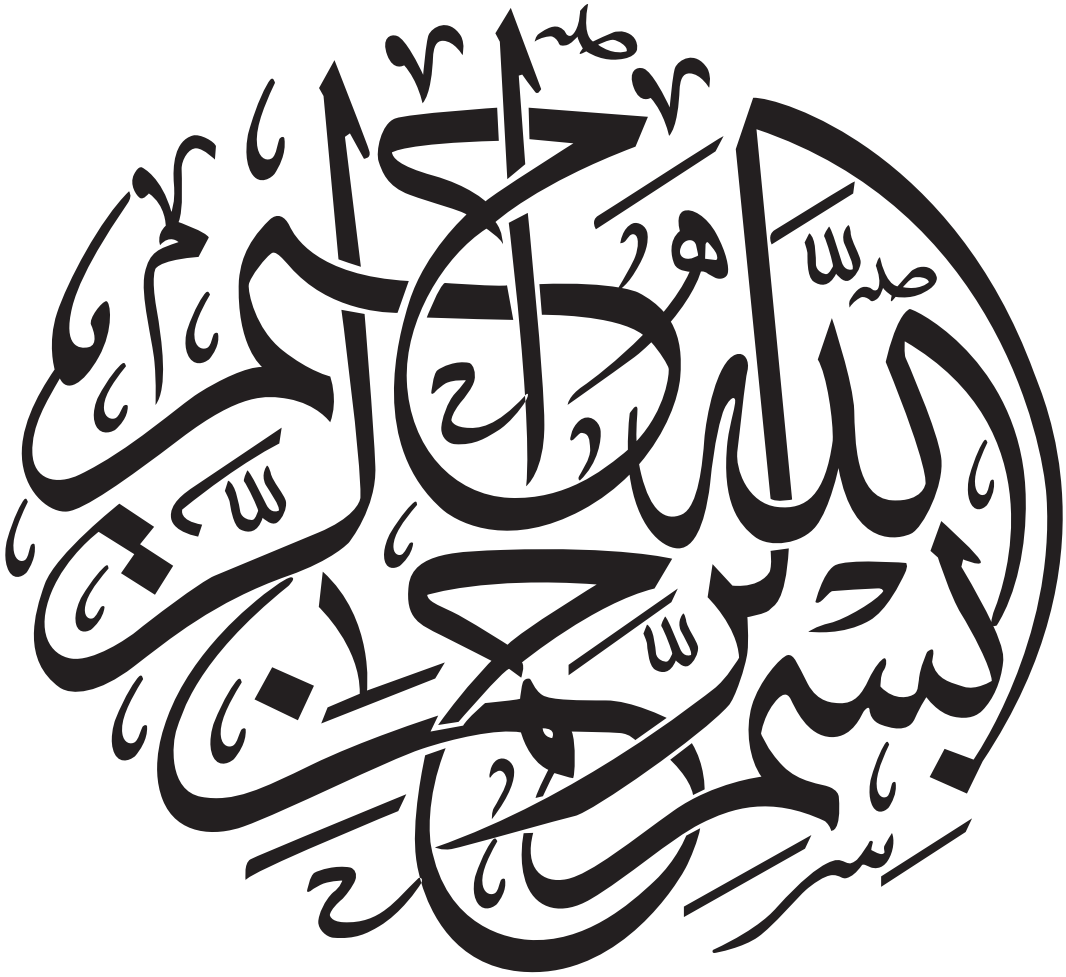
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی شیراز

دانشکده علوم، گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

در رشته فوتونیک گرایش فیزیک

بررسی انتشار پالس‌های فضا زمانی لیزر قفل‌شده‌ی مد با عدسی کر

پژوهش و نگارش:

محمد صادق کاظم‌پورفرد

استاد راهنما:

دکتر علیرضا کشاورز

استاد مشاور:

دکتر غلامرضا هنرآسا

آبان ۱۳۹۲

تقدیم به

خدایی که آفرید

جهان را، انسان را، عقل را، علم را

معرفت را، عشق را

تقدیم به

چشمان پر محبت مادرم که زیباترین نقش نگارستان خاطرام، سیمای اوست

دل دریایی پدرم که تقویم زندگی نیز تلافی گر یک نگاه محبت آمیزش نیست

قدردانی و سپاس

به نام پروردگار یکتا

سپاس آن بی‌همتایی که مانند همیشه با الطاف بی‌پایانش در انجام و به پایان رساندن این رساله مرا یاری نمود. او را سپاس می گویم که مرا لایق آموختن گردانید. همچنین به مصداق حدیث شریفه «من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق» بسی شایسته است، از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر کشاورز که با کرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی های کارساز و سازنده بارور ساختند؛ تقدیر و تشکر نمایم. اینجانب در مدت آشنایی با ایشان علاوه بر آموزه های بسیار زیاد علمی، روش جدیدی از تفکر خلاقانه همراه با اعتماد به نفس و جسارت علمی را فرا گرفتم. به علاوه از جناب آقای دکتر هنرآسا که با راهنمایی و تشویق های دلسوزانه خود، راه را برای اجرا و انجام این پایان نامه فراهم نمودند، تقدیر و تشکر نمایم.

معلما مقامت ز عرش برتر باد　　همیشه توسن اندیشه ات مظفر باد

به نکته های دلاویز و گفته های بلند　　صحیفه های سخن از تو علم پرور باد

همچنین از پدر، مادر و برادر دلسوز و مهربانم که آرامش روحی و آسایش فکری فراهم نمودند تا با حمایتهای همه جانبه در محیطی مطلوب، مراتب تحصیلی و نیز پایان نامه درسی را به نحو احسن به اتمام برسانم؛ سپاسگزاری مینمایم.

شکر خدا که هر چه طلب کردم از خدا بر منتهای همت خود کامران شدم

در پایان و نه کمتر از آغاز، تشکر میکنم از همه اساتید و دوستانی که از همراهی و یاریشان بهره‌مند شدم...

چکیده

بررسی انتشار پالس‌های فضا زمانی لیزر قفل‌شده‌ی مد با عدسی کر

پژوهش و نگارش:
محمد صادق کاظم‌پورفرد

لیزرهای قفل‌شده مد با عدسی کر، یکی از مهم‌ترین منابع تولید پالس‌های فوق‌کوتاه می‌باشند. در نتیجه بررسی فضایی و زمانی پالس‌های تولید شده توسط این لیزرها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که موضوع این تحقیق می‌باشد. اگرچه بررسی دقیق انتشار پالس‌های فوق‌کوتاه در یک محیط اپتیکی غیرخطی، توسط معادله غیرخطی شرودینگر انجام می‌شود؛ اما در لیزرها، ابتدا تشدیدگر انفعالی مورد نیاز طراحی شده و انتشار پرتو پیوسته آن در رفت و برگشت‌های مختلف بررسی می‌گردد. سپس جهت تولید پالس‌های فوق کوتاه توسط این تشدیدگر از یکی از روش‌های قفل‌شدگی مد استفاده می‌شود؛ ازآنجاکه عوامل مختلفی بر پهنای زمانی پالس تولید شده موثر می‌باشد، در این پژوهش به این موضوع پرداخته می‌شود. در این راستا با در نظر گرفتن یکی از چیدمان‌های متداول لیزرهای قفل‌شده مد با عدسی کر، ماتریس انتقال یک رفت و برگشت در کاواک را بدست آورده و ناحیه پایداری مشترک دو صفحه افقی و عمودی را محاسبه می‌کنیم. با کمینه‌سازی حساسیت عدسی کر به ازای طول تشدیدگر، موقعیت محیط کر در آن و توان درونی تشدیدگر، سامانه را جهت شروع به کار خودکار بهینه می‌کنیم. همچنین، تاثیر توان درونی لیزر بر حساسیت عدسی کر در این عملکرد بهینه را با عملکرد عادی بررسی و مقایسه می‌کنیم. نتایج نشان می‌دهند که توان درون تشدیدگر در طراحی لیزرهای قفل‌شده مد با عدسی کر تاثیر به‌سزایی دارد. به‌علاوه در این تحقیق تشدیدگری برای تولید پرتوهای بسل- گاوس اصلاح شده معرفی کرده و روش تولید پالس‌های فوق کوتاه این پرتوها را بیان می‌کنیم. نتایج این پژوهش می‌تواند پیشنهادهای کاربردی فراوانی جهت طراحی و ساخت لیزرهای فمتوثانیه بیان نماید.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل ۱: مقدمه **۱**

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ تاریخچه تحول روش‌های تولید پالس‌های فوق کوتاه ۳

۱-۳ روش‌های اصلی تولید پالس‌های کوتاه و فوق کوتاه ۷

۱-۳-۱ روش کلید زنی Q ۷

۱-۳-۲ روش قفل‌شدگی مد با استفاده از عدسی کر ۷

۱-۳-۳ روش آیینه‌های نیمه‌هادی جاذب اشباع پذیر ۹

۱-۴ معرفی برخی از مواد بهره پر کاربرد در لیزرهای قفل‌شده مد ۱۰

۱-۴-۱ مواد میزبان ۱۰

۱-۴-۲ یون‌های فعال ۱۱

۱-۴-۳ فرآیندهای دمش اپتیکی ۱۲

۱-۵ علت اهمیت این تحقیق ۱۴

فصل ۲: روش‌های قفل‌شدگی مد **۱۶**

۲-۱ مقدمه ۱۷

۲-۲ مبانی نظری ۱۸

۲-۳ روش‌های قفل‌شدگی مد ۲۵

۲-۴ قفل‌شدگی مد فعال ۲۶
۲-۴-۱ مدولاسیون دامنه ۲۷
۲-۴-۲ مدولاسیون فرکانس ۲۷
۲-۵ قفل‌شدگی مد انفعالی ۲۸
۲-۵-۱ قفل‌شدگی مد توسط جاذب‌های مایع رنگی اشباع پذیر ۲۹
۲-۵-۲ قفل‌شدگی مد با استفاده از عدسی کر ۳۳
۲-۵-۳ قفل‌شدگی مد توسط آیینه‌های نیمه‌هادی جاذب اشباع پذیر ۳۵
۲-۵-۴ قفل‌شدگی مد توسط پالس‌های افزودنی ۳۷
۲-۶ قفل‌شدگی مد پالسی ۳۸
۲-۷ قفل‌شدگی مد سالیتونی ۳۸
۲-۸ تجهیزات ضروری جهت لیزرهای قفل‌شده مد ۳۹
۲-۸-۱ روش جفت منشور ۴۰
۲-۸-۲ روش‌های اندازه‌گیری دامنه و فاز پالس‌های فوق کوتاه ۴۱
۲-۹ کاربردهای لیزرهای قفل‌شده مد ۴۲
۲-۹-۱ پهنای پالس فوق‌کوتاه ۴۲
۲-۹-۲ آهنگ بالای تکرار پالس ۴۳
۲-۹-۳ پهنای فرکانسی وسیع ۴۳
۲-۹-۴ بیشینه توان بالا ۴۴

فصل ۳: لیزرهای قفل‌شده‌ی مد با عدسی کر **۴۵**

۳-۱ مقدمه ۴۶
۳-۲ اثر غیرخطی کر ۴۶
۳-۲-۱ مبانی نظری ۴۷
۳-۲-۲ تاثیرات پدیده کر بر روی پرتو ۴۹
۳-۳ بررسی انتشار پرتو توسط قانون $ABCD$ ۵۲

۳-۳-۱ ردیابی پرتو داخل تشدیدگر لیزر ۵۴
۳-۳-۲ بررسی پایداری تشدیدگر لیزر ۵۵
۳-۳-۳ انتشار پرتو گاوسی ۵۵
۳-۳-۴ قانون $ABCD$ ۵۷
۳-۳-۵ ماتریس انتشار محیط غیرخطی کر ۵۹
۳-۴ ضرب پهنای زمانی- فرکانسی ۶۵
۳-۵ تشدیدگر لیزرهای قفل‌شده‌ی مد با عدسی کر ۶۹
۳-۵-۱ نحوه بررسی پایداری تشدیدگر لیزر ۷۰
۳-۵-۲ نحوه طراحی تشدیدگر لیزر بهینه ۷۱

فصل ۴: طراحی بهینه‌ی لیزر قفل‌شده‌ی مد با عدسی کر **۷۲**

۴-۱ مقدمه ۷۳
۴-۲ مبانی طراحی لیزر قفل‌شده مد با عدسی کر ۷۴
۴-۲-۱ معرفی پارامترها ۷۵
۴-۲-۲ جبران سازی آستیگماتیسم ۷۶
۴-۳ بررسی پایداری تشدیدگر لیزر قفل‌شده مد با عدسی کر ۷۹
۴-۳-۱ بررسی تاثیر توان بر پایداری تشدیدگر ۸۴
۴-۴ بهینه سازی تشدیدگر لیزر قفل‌شده مد با عدسی کر ۸۶
۴-۴-۱ بررسی تاثیر توان بر حساسیت عدسی کر ۸۸
۴-۵ بررسی تغییرات پهنای پرتو ۹۰
۴-۶ بررسی فضا زمانی پالس نوری در محیط اپتیکی ۹۳

فصل ۵: شکل‌دهی به پرتو لیزر **۹۵**

۵-۱ مقدمه ۹۶
۵-۲ شکل‌های مختلف پرتو لیزر ۹۷
۵-۳ بررسی روش‌های انتشار پرتو با شکل‌های مختلف ۹۸

۵-۳-۱ روش تحلیلی تقریبی ماتریس $ABCD$ ۹۹
۵-۳-۲ روش عددی انتشار پرتو ۱۰۸
۵-۴ روش‌های تولید پرتوهای مختلف ۱۱۴
۵-۴-۱ استفاده از چیدما اپتیکی ۱۱۴
۵-۴-۲ استفاده از الگوهای فازی ۱۲۰
۵-۴-۳ شکل‌دهی پرتو لیزر درو تشدیدگر ۱۲۳
۵-۵ تولید شکل‌های مختلف پالس‌های فوق کوتاه ۱۳۰
۵-۵-۱ تولید پالس‌های گردابی فمتوثانیه با استفاده از الگوهای پراشی . . . ۱۳۲
۵-۵-۲ ایجاد تشدیدگر قفل‌شده مد با عدسی کر برای پرتوهای غیرگاوسی . ۱۳۴

فصل ۶: نتیجه‌گیری و پیشنهادات **۱۳۵**
۶-۱ خلاصه ۱۳۶
۶-۲ نتیجه‌گیری ۱۳۷
۶-۳ پیشنهادات ۱۴۲

پیوست الف: الگوریتم بهینه‌سازی تجمعی ذرات **۱۴۴**
الف-۱ مقدمه ۱۴۵
الف-۲ شر ح مسئله بهینه‌سازی ۱۴۶
الف-۳ الگوریتم بهینه‌سازی تجمعی ذرا ت ۱۴۶

مراجع **۱۴۹**

واژه‌نامه فارسی به انگلیسی **۱۶۶**

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱: مقایسه روش‌های مختلف تولید پالس‌های کوتاه و فوق کوتاه [۱۰،۲۱،۲۲،۳۹] ۱۰

جدول ۲-۱: مشخصات پالس‌های قفل‌شده مد به ازای مواد بهره متفاوت [۱۰]. . . ۲۵

جدول ۳-۱: مقدار ضریب شکست خطی و غیرخطی در مواد مختلف [۲۳]. ۴۹

جدول ۳-۲: ماتریس $ABCD$ چند عنصر اپتیکی [۴۵]. ۵۳

جدول ۳-۳: مشخصات یک پالس گاوسی. ۶۶

جدول ۳-۴: مشخصات یک پالس‌های مختلف. ۶۹

جدول ۴-۱: مقدار پارامترهای تشدیدگر لیزر قفل‌شده مد با عدسی کر (چیدمان شکل ۴-۱) ۷۶

جدول ۴-۲: مقدار تصحیح شده پارامترهای تشدیدگر لیزر قفل‌شده مد با عدسی کر (چیدمان شکل ۴-۱) ۷۹

جدول ۴-۳: مقدار پارامترهای لیزر قفل‌شده مد با عدسی کر در عملکرد بهینه. . . ۸۸

جدول ۴-۴: مقدار پارامترهای لیزر قفل‌شده مد با عدسی کر در عملکرد عادی . . ۸۸

جدول ۵-۱: حالت‌های خاص معادله (۵-۷) ۱۰۳

جدول ۵-۲: برخی از این توابع عبور محیط‌های اپتیکی خطی. ۱۱۳

جدول ۵-۳: معرفی پارامترهای بهینه‌سازی چیدمان شکل ۵-۱۱. . . . . ۱۲۰
جدول ۵-۴: مقادیر بهینه برای تبدیل پرتو گاوسی به پرتوهای بسل- گاوس
اصلاح‌شده مراتب بالاتر از صفر توسط چیدمان شکل ۵-۱۱. . . . . ۱۲۱
جدول ۵-۵: معرفی توابع استفاده شده در فصل پنجم. ۱۲۲
جدول ۵-۶: شرایط پایداری هندسی تشدیدگر $ABGR$ ۱۲۸
جدول ۵-۷: پارامترهای بهینه‌سازی چیدمان شکل ۵-۱۱ جهت تولید مدهای
مختلف پرتو MBG. ۱۳۰
جدول ۵-۸: طول مناسب تشدیدگر چیدمان شکل ۵-۱۱ و مشخصات جدول ۵-۷
جهت تولید شکل‌های مختلف پرتو نوری. ۱۳۰

جدول الف-۱: تعریف پارامترهای الگوریتم PSO ۱۴۶

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱: بازه‌های زمانی مختلفی که در جهان وجود دارند [۲۳]. ۵

شکل ۱-۲: پهنای پالس که در لیزرهای مختلف به ازای سال‌های میلادی بدست آمده است [۲۲]. ۶

شکل ۱-۳: نحوه عملکرد یک سامانه کلید زنی Q [۱۰]. (الف) افت در تشدیدگر (ب) وارونی جمعیت (ج) شار نور ۸

شکل ۱-۴: توزیع طول موج جذب و نشر در ماده $Ti : Sapphire$ [۴۳]. ۱۲

شکل ۱-۵: کاواک دمش میله ماده فعال با لامپ درخش. هدر رفت انرژی با آب خنک می‌گردد [۴۳]. ۱۳

شکل ۱-۶: شمای چیدمان دمش با لیزر دیسکی نازک. دیسک در کانون آیینه سهموی قرار می‌گیرد. دمش با ۱۶ تا ۲۴ بار عبور از ماده فعال انجام می‌شود [۳۲، ۳۳]. ۱۴

شکل ۲-۱: توزیع مدهای طولی لیزر در فضای فرکانس [۱۰]. ۱۹

شکل ۲-۲: پرتو پیوسته (حالت بدون قفل‌شدگی مد) [۱۰]. (الف) توزیع شدت در فضای زمان و (ب) توریع فاز در فضای فرکانس. ۲۰

شکل ۲-۳: پالس قفل‌شده مد [۱۰]. (الف) توزیع شدت در فضای زمان و (ب) توریع فاز در فضای فرکانس. ۲۱

شکل ۲-۴: قفل‌شدگی پنج مد طولی در یک تشدیدگر به طول $15cm$ ۲۳
شکل ۲-۵: توزیع بهره با پوش گاوسی مدهای طولی لیزر در فضای فرکانس. . . . ۲۵
شکل ۲-۶: شمای اپتیکی یک لیزر قفل‌شده مد فعال [۱۰]. ۲۶
شکل ۲-۷: نحوه عملکرد یک لیزر قفل‌شده مد فعال [۱۰]. (الف) مدولاسیون دامنه و (ب) مدولاسیون فاز. ۲۷
شکل ۲-۸: نحوه عملکرد یک لیزر قفل‌شده مد انفعالی [۲۱]. (الف) جاذب اشباع پذیر آهسته به همراه ماده بهره اشباع‌پذیر. (ب) جذب اشباع پذیر سریع. (ج) جاذب اشباع پذیر آهسته بدون بهره اشباع‌پذیر. ۲۸
شکل ۲-۹: شمای کلی لیزر قفل‌شده مد رنگی به همراه منحنی‌های مواد جذب و بهره اشباع پذیر آن [۴۳]. ۳۰
شکل ۲-۱۰: تغییرات شکل پالس لیزر هنگام عبور از مواد جذب و بهره اشباع پذیر [۴۳]. ۳۱
شکل ۲-۱۱: فرآیند کوتاه‌سازی پهنای پالس لیزر توسط مواد جذب و بهره اشباع پذیر [۳۹]. ۳۱
شکل ۲-۱۲: شمای سامانه لیزر قفل‌شده مد رنگی به همراه ساختار عملکرد آن [۴۳]. ۳۲
شکل ۲-۱۳: نمای فنی سامانه قفل‌شدگی مد توسط جاذب‌های اشباع پذیرر رنگی [۱۰]. ۳۲
شکل ۲-۱۴: شمای روش قفل‌شدگی مد با استفاده از عدسی کر و روزنه سخت [۲۳]. ۳۵
شکل ۲-۱۵: شمای روش قفل‌شدگی مد با استفاده از عدسی کر و روزنه نرم [۲۳]. ۳۵
شکل ۲-۱۶: توزیع ضریب بازتابش پرتو از یک $SESAM$ [۴۳]. ۳۶
شکل ۲-۱۷: شمای روش قفل‌شدگی مد توسط توسط پالس‌های افزودنی [۵۸]. . . ۳۷
شکل ۲-۱۸: مقایسه روش‌های قفل‌شدگی مد پیوسته و پالسی [۳۹]. ۳۸
شکل ۲-۱۹: شمای روش جفت منشور [۱۰]. ۴۱
شکل ۲-۲۰: شمای روش همبستگی [۴۴]. ۴۲

شکل ۲-۲۱: مقایسه دقت سوراخ‌کاری میکروسکپی لیزرهای پالسی با پهنای زمانی مختلف [۴۳]. ۴۴

شکل ۳-۱: نمایش پدیده خود کانونی. ۵۰
شکل ۳-۲: تغییر فرکانس در محیط کر ناشی از پدیده SPM [۲۳]. ۵۲
شکل ۳-۳: شمای نحوه ردیابی پرتو با ماتریس $ABCD$. ۵۳
شکل ۳-۴: نحوه محاسبه ماتریس انتقال یک چرخه کامل. ۵۴
شکل ۳-۵: انتشار مد عرضی $TEM_{..}$ پرتو گاوسی در فضای آزاد [۴۵]. ۵۹
شکل ۳-۶: انتشار پرتو در یک محیط غیرهمگن [۴۵]. ۶۰
شکل ۳-۷: شبیه‌سازی انتشار پرتو گاوسی در محیط غیرخطی کر به ازای مقادیر مختلف توان ورودی. ۶۴
شکل ۳-۸: میدان الکتریکی و شدت اپتیکی بهنجارشده یک پالس گاوسی بدون چیرپ با مشخصات جدول ۳-۳. . . . . ۶۶
شکل ۳-۹: میدان الکتریکی بهنجارشده یک پالس گاوسی با چیرپ خطی و مشخصات جدول ۳-۳. . . . . ۶۷
شکل ۳-۱۰: میدان الکتریکی و شدت اپتیکی بهنجارشده یک پالس گاوسی بدون چیرپ با مشخصات جدول ۳-۳. . . . . ۷۰
شکل ۳-۱۱: چیدمان تشدیدگر لیزر قفل‌شده مد با عدسی کر [۱۰]. ۷۱

شکل ۴-۱: چیدمان تشدیدگر لیزر قفل‌شده مد با عدسی کر [۹۷،۹۶]. ۷۶
شکل ۴-۲: نمایش نقص اپتیکی آستیگماتیسم [۲۳]. ۷۷
شکل ۴-۳: چیدمان خطی تشدیدگر لیزر قفل‌شده مد با عدسی کر (شکل ۴-۱) براساس روش اول [۱۰]. ۸۰
شکل ۴-۴: ناحیه پایداری سامانه شکل ۴-۳ [۱۰]. ۸۱

شکل ۴-۵: ناحیه پایداری لیزر قفل‌شده مد (چیدمان شکل ۴-۱) به ازای طول تشدیدگر مرکزی و براساس روش اول. خط‌چین جهت صفحه افقی، نقطه‌چین جهت صفحه عمودی، خط جهت مقدار میانگین این دوصفحه. ۸۲
شکل ۴-۶: چیدمان خطی تشدیدگر لیزر قفل‌شده مد با عدسی کر (شکل ۴-۱) براساس روش دوم [۹۷]. ۸۲
شکل ۴-۷: ناحیه هاشور خورده، ناحیه پایداری لیزر KLM (چیدمان شکل ۴-۱) بر حسب طول تشدیدگر مرکزی (Z) و فاصله محیط کر با یکی از آیینه‌های این تشدیدگر (X)، براساس روش دوم را بیان می‌کند که به ازای (a) $p = ۰.۵p_{cr}$، (b) $p = p_{cr}$ (c) $p = ۴p_{cr}$ می‌باشد. ۸۵
شکل ۴-۸: نمودار حساسیت عدسی کر بر حسب توان درون تشدیدگر برای عملکرد بهینه. ۸۹
شکل ۴-۹: نمودار حساسیت عدسی کر بر حسب توان درون تشدیدگر برای عملکرد عادی. ۸۹
شکل ۴-۱۰: تغییرات پهنای بهنجار شده پرتو حین انجام رفت و برگشت درون تشدیدگر لیزر قفل‌شده مد با عدسی کر (چیدمان شکل ۴-۱)، جهت یک حالت پایدار عادی با مشخصات جدول ۴-۴. . . . . ۹۱
شکل ۴-۱۱: تغییرات پهنای بهنجار شده پرتو حین انجام رفت و برگشت درون تشدیدگر لیزر قفل‌شده مد با عدسی کر (چیدمان شکل ۴-۱)، جهت یک حالت ناپایدار و مشخصات جدول ۴-۴ با این تفاوت که در این حالت طول تشدیدگر مرکزی $z = ۱۱۵\ mm$ انتخاب شده است. ۹۲
شکل ۴-۱۲: تغییرات پهنای بهنجار شده پرتو حین انجام رفت و برگشت درون تشدیدگر لیزر قفل‌شده مد با عدسی کر (چیدمان شکل ۴-۱)، جهت حالت پایدار بهینه با مشخصات جدول ۴-۳. . . . . ۹۳

شکل ۵-۱: توزیع بهنجار شده شدت پرتو MBG مرتبه $m = ۰$ به ازای درجه‌های همدوسی مختلف. ۹۸
شکل ۵-۲: توزیع بهنجار شده شدت برخی از مدهای بالاتر از صفر پرتوهای MBG به ازای درجه همدوسی $\xi = ۰.۵$. ۹۹
شکل ۵-۳: انتشار پرتو هرمیت- کسینوس هایپربولیک- گاوس در فضای آزاد. . . . ۱۰۱
شکل ۵-۴: توزیع شدت پرتو پرتو بسل- گاوس درجه‌دو با روزنه حلقوی. ۱۰۴
شکل ۵-۵: توزیع بهنجار شده عرض پرتو هنگام انتشار در محیط بهره ناهمگن با $\gamma_۰ = ۰$ و $\gamma_۲$ مشخص. ۱۰۹
شکل ۵-۶: الگوریتم حلقه تکرار روش عددی $SSFBPM$ [۱۲۴]. ۱۱۳
شکل ۵-۷: نمایش نحوه تولید یک پرتو بسل- گاوس توسط اکسیکن. ۱۱۵
شکل ۵-۸: شبیه‌سازی سه بعدی انتشار یک پرتو گاوسی عبوری از اکسیکن با زاویه گشودگی $\alpha = ۱^o$ که منجر به تولید پرتو بسل- گاوس شده است. . . . ۱۱۸
شکل ۵-۹: مقایسه پرتو گاوسی عبوری از اکسیکن که توسط روش $SSFBPM$ شبیه‌سازی شده است (رنگ آبی) و شکل اصلی پرتو بسل- گاوس (رنگ قرمز) (رابطه (۵-۳۷)) در دو طول مختلف انتشار (الف) $z = z_{max}/۴$ و (ب) $z = z_{max}/۲$. ۱۱۹
شکل ۵-۱۰: توزیع ضریب هم‌پوشانی پرتو گاوسی عبوری از اکسیکن که توسط روش $SSFBPM$ شبیه‌سازی شده است و شکل اصلی پرتو بسل- گاوس (رابطه (۵-۳۷)) براساس طول بهنجار شده انتشار. ۱۱۹
شکل ۵-۱۱: چیدمان تبدیل پرتو گاوسی به پرتوهای بسل- گاوس اصلاح‌شده مراتب بالاتر از صفر. ۱۲۰
شکل ۵-۱۲: مقایسه پرتو گاوسی عبوری از اکسیکن که برای تولید پرتوهای MBG مطابق جدول ۵-۴ بهینه شده‌اند (رنگ آبی) با پرتوهای MBG متناظر (رنگ قرمز) که توسط رابطه (۵-۱) ترسیم شده‌اند به ازای مراتب مختلف پرتو (الف) $m = ۱$، (ب) $m = ۳$ و (ج) $m = ۵$. ۱۲۱

شکل ۵-۱۳: الگوی پراشی اکسیکن با زاویه گشودگی $\alpha = ۱^o$. ۱۲۳
شکل ۵-۱۴: مقایسه پرتو گاوسی عبوری از طرح پراشی اکسیکن که توسط روش $SSFBPM$ شبیه‌سازی شده است (رنگ آبی) و شکل اصلی پرتو بسل- گاوس (رنگ قرمز) (رابطه (۵-۳۷)) در دو طول مختلف انتشار (الف) $z = z_{max}/۴$ و (ب) $z = z_{max}/۲$. ۱۲۴
شکل ۵-۱۵: توزیع ضریب هم‌پوشانی پرتو گاوسی عبوری از طرح پراشی اکسیکن که توسط روش $SSFBPM$ شبیه‌سازی شده است و شکل اصلی پرتو بسل- گاوس (رابطه (۵-۳۷)) براساس طول بهنجار شده انتشار. ۱۲۵
شکل ۵-۱۶: چیدمان تشدیدگر پرتو BG که به‌وسیله (الف) اکسیکن شکستی (ب) اکسیکن بازتابی، عمل می‌کند و (ج) راهنمای عدسی گونه این تشدیدگر. . . ۱۲۶
شکل ۵-۱۷: نمایش شرط همسازی مسیر پرتو پایدار در یک و دو رفت و برگشت. ۱۲۸
شکل ۵-۱۸: مقایسه پرتوهای MBG تولید شده توسط تشدیدگر کوک پذیر شکل پرتو (چیدمان شکل ۵-۱۱) که با مشخصات اکسیکن مطابق جدول ۵-۷ ایجاد شده‌اند (نقاط سبز) با پرتوهای MBG متناظر (رنگ قرمز) که توسط رابطه (۵-۱) ترسیم شده‌اند به ازای مراتب مختلف پرتو (الف) $m = ۱$، (ب) $m = ۳$ و (ج) $m = ۵$ که به ترتیب توسط طول‌های $z_{max} \times ۳.۳۸۴$، $z_{max} \times ۵.۰۵۶$ و $z_{max} \times ۶.۱۴۴$ تشدیدگر ایجاد شده‌اند. که نمودار آبی رنگ نقاط سبز براساس رابطه (۵-۵۱) منطبق شده است. ۱۳۱
شکل ۵-۱۹: الگوهای پراش دودویی که براساس معادله (۵-۵۲) به ازای (الف) $M = ۰$ و (ب) $M = ۱$ ایجاد شده‌اند [۱۴۱]. ۱۳۳
شکل ۵-۲۰: چیدمان روش جفت توری [۱۴۱]. ۱۳۴

شکل الف-۱: نحوه تغییر مکان در الگوریتم گروه ذرات [۱۴۳]. ۱۴۷
شکل الف-۲: فلوچارت الگوریتم گروه ذرات [۱۴۳]. ۱۴۸

فصل۱

مقدمه

۱-۱ مقدمه

مبنای روش قفل‌شدگی مد در لیزرها، هم فاز شدن مدهای طولی در لیزر است. این روش، امکان تولید پالس‌های فوق کوتاه را فراهم می‌کند. به لیزرهای ساخته شده با این روش، لیزرهای فوق سریع می‌گویند. زیرا این لیزرها، یک ابزار مهم جهت بررسی دینامیک سامانه‌های فیزیکی در بازه‌های زمانی بسیار کوتاه می‌باشند که امکان درک بهتر از نحوه‌ی عملکرد تجهیزات و پدیده‌ها در علوم، فناوری و پزشکی را فراهم می‌کنند. به‌علاوه، پالس‌های فوق کوتاه (بسیار کوتاه‌تر از $۱۰fs$) با آهنگ تکرار بسیار بالا (بیشتر از $۱۰۰GHz$)، امکان دسترسی به بیشینه شدت‌های اپتیکی بسیار زیاد (بیشتر از $۱۰TW/cm^۲$) و باند طیفی بسیار پهن را فراهم می‌کنند [۱-۵]. این عوامل باعث می‌شوند که این لیزرها کاربردهای بی‌شماری در حوزه‌های مختلف از جمله پردازش ماده، اپتیک غیرخطی و علوم اندازه‌گیری داشته باشند.

تاکنون، بیش از چهار دهه است که دانشمندان همواره تلاش‌های خستگی‌ناپذیری برای کاهش پهنای پالس و افزایش شدت در لیزرها داشته‌اند. در این میان، نقطه بلوغ این علم به دهه ۱۹۹۰ میلادی و شکل‌گیری دو روش آیینه‌های نیمه‌هادی جاذب اشباع پذیر ($SESAM$[۱]) و قفل‌شدگی مد توسط عدسی کر (KLM[۲]) بر می‌گردد. با توجه به قابلیت‌های یاد شده، پیش بینی می‌شود که روش‌های مزبور در آینده نزدیک تحولات شگرفی را در عرصه‌های گسترده‌ای از دانش‌ها و فناوری‌های نوین پدید آورند. این مهم موجب شده است که در این پایان نامه به بررسی پارامترهای موثر بر لیزرهای KLM پرداخته شود. در این فصل ابتدا مروری بر تاریخچه تحول روش‌های تولید پالس‌های فوق کوتاه خواهیم داشت. سپس چند روش اصلی تولید پالس‌های کوتاه و فوق کوتاه را بررسی و مقایسه می‌کنیم. در ادامه، برخی از مواد بهره

[۱] Semiconductor Saturable Absorber Mirrors
[۲] Kerr Lens Mode locking

پر کاربرد در لیزرهای قفل‌شده مد را معرفی خواهیم کرد. در نهایت، به خلاصه‌ای از فعالیت جدیدی که در این تحقیق انجام می‌شود، اشاره می‌کنیم.

۲-۱ تاریخچه تحول روش‌های تولید پالس‌های فوق کوتاه

تحقیق در زمینه لیزرها با کشف اثر گسیل القایی تابش توسط انیشتین[۱] در سال ۱۹۱۶ میلادی شروع شد [۶]. در ابتدا فرآیند تقویت پرتو با گسیل القایی تابش، در دستگاه‌هایی به نام میزر[۲] در ناحیه میکروویو استفاده شد [۷]. در ادامه، اولین لیزر توسط مایمن[۳] در سال ۱۹۶۰ ساخته شد که در طول موج $\lambda = ۶۹۴nm$ کار می‌کرد [۸]. مایمن در تشابه با میزر، نام لیزر که برگرفته از عبارت " تقویت نور به وسیله گسیل القایی تابش[۴]" می‌باشد، را برای دستگاه خود انتخاب کرد. از آن به بعد این کلمه کاربرد وسیعی در ناحیه طول موج مرئی پیدا کرد.

در ادامه نیاز به تولید پالس‌های کوتاه و فوق کوتاه احساس شد. پالس‌های کوتاه، دارای پهنای زمانی چند ده نانو ثانیه ($۱۰^{-۹}s$) می‌باشند که اکثرا توسط یک سامانه کلید زنی Q تولید می‌شوند. کلید کشف این روش، در سال ۱۹۶۲ توسط هلوارث[۵] رقم خورد [۹].

با اختراع روش کلید زنی Q علاوه بر کاهش چشم‌گیر پهنای پالس‌ها، شدت پرتو نیز فوق‌العاده افزایش یافت؛ اما با توجه به طول تشدیدگر، محدودیت‌هایی در این روش وجود دارد که تولید پالس‌هایی با پهنای کمتر از نانوثانیه را غیرممکن می‌کند [۱۰]. بنابراین احتیاج مبرم علوم مختلف به پالس‌هایی با پهنای کوتاه‌تر و دوره تکرار بیشتر، باعث اختراع روش‌های دیگری جهت تولید پالس‌های فوق کوتاه شد.

به پالس‌های با پهنای زمانی پیکو ثانیه ($۱۰^{-۱۲}s$) و فمتو ثانیه ($۱۰^{-۱۵}s$)، پالس‌های فوق کوتاه می‌گویند. این نوع پالس‌ها با استفاده از لیزرهای حالت جامد و روش‌های قفل‌شدگی مد تولید می‌شوند. به هم فاز شدن مدهای طولی لیزر به اصطلاح، قفل‌شدگی مد می‌گویند. به کارگیری این روش موجب می‌شود که پهنای زمانی پالس‌ها، نسبت معکوسی با پهنای طیف‌های

[۱] Einstein
[۲] Maser
[۳] Maiman
[۴] Light Amplification by Stimulated Emition of Radiation (LASER)
[۵] Hellwarth