

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



گروه اپتیک و لیزر

پایان نامه کارشناسی ارشد

در رشته فیزیک اتمی گرایش اپتیک و لیزر

طراحی و برپائی لیزر چشم-ایمن مبتنی بر نوسانگر پارامتریک اپتیکی داخل

کاواک

اساتید راهنما

دکتر مسعود کاوش تهرانی

دکتر رسول صدیقی

استاد مشاور

مهندس سعید ناظم

پژوهشگر

سمانه مستأجران

شهریور ۸۹

تقدیم به

دستان پر مهر پدرم و روح پاک مادرم

که هر آنچه به دست آورده‌ام حاصل تربیت مشفقانه و دعای خیر آنهاست.

آفریدگار مهربانم را حمد و سپاس می‌گویم که توفیق انجام این کار را به اینجانب ارزانی نمود.

نهایت سپاس و تشکر خویش را از اساتید راهنمای محترم جناب آقای دکتر مسعود کاوش تهرانی جهت راهنمایی‌ها و حمایت‌های ارزنده‌شان و دکتر رسول صدیقی جهت همراهی‌شان با این پروژه اعلام می‌دارم. همچنین از استاد مشاور محترم جناب آقای مهندس سعید ناظم جهت زحمات بی‌دریغ و مشاوره‌های راه‌گشایشان برای انجام این پروژه کمال تشکر و قدردانی را دارم. از مسئولین و کارکنان محترم پژوهشکده‌ی لیزر شرکت صنایع الکترواپتیک اصفهان به ویژه جناب آقای مهندس محسن رضانی جهت همکاری و فراهم آوردن تسهیلات لازم برای انجام این پروژه سپاسگذاری می‌نمایم.

نام خانوادگی دانشجو : مستأجران

نام : سمانه

عنوان پایان نامه : طراحی و برپائی لیزر چشم-ایمن مبتنی بر نوسانگر پارامتریک اپتیکی داخل کاواک

اساتید راهنما : دکتر مسعود کاوش تهرانی و دکتر رسول صدیقی

استاد مشاور : مهندس سعید ناظم

مقطع تحصیلی : کارشناسی ارشد رشته : فیزک اتمی گرایش : اپتیک و لیزر دانشگاه : تبریز

دانشکده : فنی مهندسی بناب تاریخ فارغ التحصیلی : ۸۹/۶/۳۱ تعداد صفحه :

کلید واژه ها : لیزر چشم-ایمن، نوسانگر پارامتریک اپتیکی

چکیده : هدف این پایان نامه تولید لیزر چشم-ایمن است. به همین منظور ابتدا به بررسی ناحیه‌ی طول موجی ایمن برای چشم و روش‌های تولید این ناحیه‌ی طول موجی پرداخته‌ایم و نوسانگرهای پارامتریک اپتیکی را به عنوان مناسب‌ترین روش برای تولید طول موج مورد نظرمان انتخاب نموده‌ایم. یک نوسانگر پارامتریک اپتیکی (OPO) متشکل از یک منبع دمش، بلور غیر خطی با زاویه‌ی برش مناسب و یک کاواک تشدید می‌باشد. از لیزر حالت جامد نئودیموم یاگ کلید زنی شده به عنوان منبع دمش OPO استفاده می‌کنیم. بنابراین به بررسی پارامترهای پایداری مشدد فعال پرداخته، اندازه و مکان کمرهای پرتو و همچنین اندازه‌ی پرتو بر روی آینه‌ها را به دست می‌آوریم. اثرات گرمائی در ماده‌ی فعال لیزری را نیز برای دو نوع دمش توسط لامپ درخشی و دمش توسط لیزر نیم‌رسانا بررسی کرده‌ایم. به منظور طراحی بلور غیر خطی زوایای جور شدگی فاز را به ازای طول موج‌های سیگنال مختلف به دست آورده و مقدار ضریب غیر خطی مؤثر را نیز در زوایای جور شدگی فاز محاسبه کرده‌ایم. اثر walk-off را نیز معرفی کرده و مقدار آن را برای پرتو سیگنال در زوایای مختلف در صفحات اصلی بلور محاسبه کرده‌ایم. در نهایت ضمن معرفی معادلات آهنگ برای نوسانگرهای پارامتریک اپتیکی داخل کاواک، با استفاده از حل عددی این معادلات برای سه نوع IOPO متفاوت، به تجزیه و تحلیل این IOPOها پرداخته‌ایم. در پایان یک نوسانگر پارامتریک اپتیکی داخل کاواک، کلیدزنی شده‌ی الکترواپتیکی تک فرکانس را که توسط لامپ درخشی دمیده شده است، برای دو نوع کاواک هوا خنک و آب خنک برپا کرده و به بررسی پارامترهای تپ سیگنال تولید شده توسط آن‌ها پرداخته‌ایم.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: تابش لیزر در محدوده چشم ایمن
۲	۱-۱- ایمنی چشم
۴	۲-۱- روشهای تولید لیزر چشم ایمن
۶	۳-۱- نوسانگرهای پارامتریک اپتیکی نانو ثانیه ای
۷	۴-۱- تاریخچه معادلات آهنگ برای تحلیل نوسانگرهای پارامتریک اپتیکی
۷	۵-۱- کاربردها
۷	۱-۵-۱- آموزش نظامی
۸	۲-۵-۱- ارتباطات لیزری
۹	۳-۵-۱- لیدار
۱۰	۴-۵-۱- رادار لیزری برای اندازه گیری فاصله بین خطوط انتقال فشار قوی و درختان نزدیک آن
۱۰	۶-۱- ساختار پایان نامه
۱۲	فصل دوم: اصول نظری لیزر چشم-ایمن
۱۳	۱-۲- مقدمه
۱۳	۲-۲- مشدد فعال
۱۳	۲-۲-۱- شبیه سازی محیط فعال لیزری معادل با یک عدسی ضخیم
۱۴	۲-۲-۲- مشدد معادل برای مشدد عدسی دار ضخیم
۲۰	۳-۲-۲- محل تشکیل کمر پرتو
۲۱	۴-۲-۲- اندازه پرتو روی صفحات اصلی عدسی گرمائی
۲۲	۵-۲-۲- فاکتور انتشار پرتو لیزر
۲۳	۳-۲-۳- اثرات گرمائی در ماده فعال لیزری
۲۳	۱-۳-۲- دمش توسط لامپ درخشی
۲۴	۱-۳-۲- توزیع دما
۲۵	۲-۳-۱-۲- اثر فوتوالاستیک

۲۶	..... ۳-۱-۳-۲ عدسی گرمائی
۲۸	..... ۲-۳-۲ دمش توسط لیزرهای نیمرسانا
۲۸	..... ۱-۲-۳-۲ شبیه سازی توزیع انرژی دمش
۳۰	..... ۲-۲-۳-۲ معادله آهنگ وابسته به مکان
۳۲	..... ۳-۲-۳-۲ تلفات پراش القائی گرمائی
۳۵	..... ۴-۲ اپتیک غیر خطی
۳۶	..... ۱-۴-۲ معادلات موج جفت شده
۴۱	..... ۲-۴-۲ نوسانگر پارامتریک اپتیکی
۴۲	..... ۳-۴-۲ بلورهای غیر خطی
۴۴	..... ۴-۴-۲ جورشدهگی فاز در بلورهای دو محوری
۴۶	..... ۵-۴-۲ جورشدهگی فاز بحرانی و غیربحرانی
۴۸	..... ۶-۴-۲ دلایل عدم جورشدهگی فاز
۴۹	..... ۷-۴-۲ بازده تبدیل فرکانسی غیرخطی و ضریب غیرخطی مؤثر
۴۹	..... ۸-۴-۲ پیکربندی های نوسانگر پارامتریک اپتیکی
۵۱	..... ۵-۲ معادلات آهنگ نوسانگرهای پارامتریک اپتیکی داخل کاواک
۵۶	..... فصل سوم: طراحی و برپائی لیزر چشم-ایمن
۵۷	..... ۱-۳ مقدمه
۵۷	..... ۲-۳ اندازه گیری فاکتور انتشار پرتو لیزر با استفاده از نرم افزار Beam star
۶۲	..... ۳-۳ اثرات گرمائی در ماده فعال لیزری
۶۲	..... ۱-۳-۳ بررسی اثرات گرمائی برای حالت دمش توسط لامپ درخشی
۶۳	..... ۲-۳-۳ بررسی اثرات گرمائی برای حالت دمش توسط لیزر نیمرسانا
۶۳	..... ۱-۲-۳-۳ شبیه سازی توزیع انرژی دمش
۶۶	..... ۲-۲-۳-۳ تلفات پراش القائی گرمائی
۶۷	..... ۳-۲-۳-۳ شبیه سازی و بهینه سازی اندازه پرتو دمش
۶۸	..... ۴-۳ طراحی بلورهای غیر خطی

- ۳-۴-۱- محاسبه زاویه جورشدهگی فاز بلورهای دو محوری..... ۶۸
- ۳-۴-۲- محاسبه ضریب غیرخطی مؤثر..... ۶۹
- ۳-۵-۵- حل عددی معادلات آهنگ برای Nd:YAG/KTP IOPO کلید زنی شده فعال دمش از پهلو توسط لیزر نیم رسانا با فرکانس بالا و فرکانس پائین..... ۷۱
- ۳-۵-۱- Nd:YAG/KTP IOPO کلید زنی شده فعال آکستوآپتیکی دمش از پهلو توسط لیزر نیم رسانا با فرکانس بالا..... ۷۱
- ۳-۵-۲- Nd:YAG/KTP IOPO کلیدزنی شده الکتروآپتیکی دمش از پهلو توسط لیزر نیم رسانا..... ۷۴
- ۳-۶-۶- Nd:YAG/KTP IOPO کلید زنی شده الکتروآپتیکی با دمش توسط لامپ درخشی..... ۷۵
- ۳-۶-۱- چیدمان و نتایج تجربی برای IOPO با کاواک هوا خنک..... ۷۵
- ۳-۶-۲- چیدمان و نتایج تجربی برای IOPO با کاواک آب خنک..... ۷۷
- ۳-۶-۳- ارزیابی نظری Nd:YAG/KTP IOPO کلید زنی شده الکتروآپتیکی با دمش توسط لامپ درخشی..... ۸۳
- مراجع..... ۸۸

شکل (۱-۱):	بیشترین انرژی ایمنی چشم بر حسب طول موج برای پرتوهای ساکن و در حال روبش	۲
شکل (۱-۲):	مشدد فعال همراه با محیط فعال لیزری مشابه با یک عدسی ضخیم	۱۴
شکل (۲-۲):	مشدد فعال همراه با محیط فعال لیزری و مشدد خالی معادل آن	۱۵
شکل (۳-۲):	افزایش طول راه نوری و کاهش طول هندسی مشدد معادل	۱۶
شکل (۴-۲):	نواحی حاشور خورده در نمودار، نواحی پایداری مشدد فعال همراه با محیط فعال لیزری را نشان می دهند.	۱۷
شکل (۵-۲):	هندسه سطح مقطع دمش جانبی با در نظر گرفتن تنها یک پرتو دمش	۲۹
شکل (۶-۲):	حجم مد آستانه بر حسب کمر پرتو دمش	۳۲
شکل (۷-۲):	کارائی همپوشانی بر حسب کمر پرتو دمش	۳۲
شکل (۸-۲):	منحنی ضریب شکست بر حسب فرکانس برای بلورهای تک محوری	۴۳
شکل (۹-۲):	منحنی ضریب شکست بر حسب فرکانس برای بلورهای دوماحوری	۴۳
شکل (۱۰-۲):	زاویه بین بردار موج و جهت شارش انرژی	۴۶
شکل (۱۱-۲):	مقدار زاویه WALK-OFF در صفحه XZ در زوایای θ مختلف	۴۶
شکل (۱۲-۲):	مقدار زاویه WALK-OFF در صفحه YZ در زوایای θ مختلف	۴۷
شکل (۱۳-۲):	پیکربندی یک نوسانگر پارامتریک اپتیکی تک تشدید	۴۹
شکل (۱۴-۲):	پیکربندی یک نوسانگر پارامتریک اپتیکی دو تشدید	۵۰
شکل (۱-۳):	فاصله کانونی عدسی گرمائی در میله لیزری بر حسب توان دمش	۶۲
شکل (۲-۳):	توزیع شدت دمش برای لیزر حالت جامد دمش جانبی از سه طرف با $\omega_{po}=300\text{MM}$	۶۳
شکل (۳-۳):	توزیع شدت دمش برای لیزر حالت جامد دمش جانبی از سه طرف با $\omega_{po}=600\text{MM}$	۶۴
شکل (۴-۳):	توزیع شدت دمش برای لیزر حالت جامد دمش جانبی از سه طرف با $\omega_{po}=900\text{MM}$	۶۴
شکل (۵-۳):	توزیع شدت دمش برای لیزر حالت جامد دمش جانبی از چهار طرف با $\omega_{po}=300\text{MM}$	۶۴
شکل (۶-۳):	توزیع شدت دمش برای لیزر حالت جامد دمش جانبی از چهار طرف با $\omega_{po}=600\text{MM}$	۶۵
شکل (۷-۳):	توزیع شدت دمش برای لیزر حالت جامد دمش جانبی از چهار طرف با $\omega_{po}=900\text{MM}$	۶۵
شکل (۸-۳):	فاصله کانونی عدسی گرمائی در میله لیزری بر حسب توان دمش	۶۶
شکل (۹-۳):	تلفات پراش القایی گرمائی بر حسب توان دمشی برای اندازه های پرتو دمش مختلف	۶۷
شکل (۱۰-۳):	نسبت دمش به مد بهینه بر حسب توان دمش	۶۷
شکل (۱۱-۳):	منحنی جورشدهگی فاز برای طول موج سیگنال در صفحه XY بلور KTP به ازای طول موج دمش 1064NM	۶۸
شکل (۱۲-۳):	منحنی جورشدهگی فاز برای طول موج سیگنال در صفحه XZ بلور KTP به ازای طول موج دمش 1064NM	۶۹
شکل (۱۳-۳):	منحنی جورشدهگی فاز برای طول موج سیگنال در صفحه YZ بلور KTP به ازای طول موج دمش 1064NM	۶۹
شکل (۱۴-۳):	منحنی ضریب غیر خطی موثر در زوایای تطبیق فازی در گستره طول موجی مجاز KTP در صفحه XY	۷۰
شکل (۱۵-۳):	منحنی ضریب غیر خطی موثر در زوایای تطبیق فازی در گستره طول موجی مجاز بلور KTP در صفحه XZ	۷۰
شکل (۱۶-۳):	منحنی ضریب غیر خطی موثر در زوایای تطبیق فازی در گستره طول موجی مجاز بلور KTP در صفحه YZ	۷۰
شکل (۱۷-۳):	توان قله بر حسب توان دمش ورودی برای آهنگ تکرار ۵ و ۱۰ کیلو هرتز	۷۲
شکل (۱۸-۳):	پهنای تپ بر حسب توان دمش ورودی و آهنگ تکرار ۵ و ۱۰ کیلو هرتز	۷۲

- شکل (۳-۱۹): انرژی در هر تپ بر حسب توان دمش ورودی و ورودی برای آهنگ تکرار ۵ و ۱۰ کیلو هرتز..... ۷۳
- شکل (۳-۲۰): فرآیند تولید تپ سیگنال، برای Nd:YAG/KTP IOPO کلید زنی شده‌ی فعال آکستوآپتیکی دمش از پهلو توسط لیزر نیم‌رسانا، به ازای توان دمش ورودی ۶۴W و فرکانس تکرار ۱۰ کیلو هرتز..... ۷۴
- شکل (۳-۲۱): فرآیند تولید تپ سیگنال، برای Nd:YAG/KTP IOPO کلید زنی شده‌ی فعال الکتروآپتیکی دمش از پهلو توسط لیزر نیم‌رسانا به ازای توان دمش ورودی ۱۵W و فرکانس تکرار ۱۰ هرتز..... ۷۴
- شکل (۳-۲۲): طحوارهای از چیدمان تجربی نوسانگر پارامتریک اپتیکی داخل کاواک..... ۷۵
- شکل (۳-۲۳): انرژی در هر تپ سیگنال بر حسب انرژی دمشی ورودی به ازای ضرایب بازتابندگی آینه‌ی خروجی ۳۰٪، ۵۰٪..... ۷۶
- شکل (۳-۲۴): رفتار زمانی تپ لیزر کلیدزنی شده Q در طول موج ۱۰۶۴ NM به ازای انرژی دمش ورودی ۵/۶ J و بازتابندگی آینه خروجی ۵۰٪..... ۷۶
- شکل (۳-۲۵): رفتار زمانی تپ سیگنال در طول موج ۱۵۷۰ NM به ازای انرژی دمش ورودی ۵/۶ J و ضریب بازتابندگی آینه خروجی ۵۰٪..... ۷۷
- شکل (۳-۲۶): چیدمان آزمایشگاهی برپاشده نوسانگر پارامتریک اپتیکی داخل کاواک..... ۷۷
- شکل (۳-۲۷): انرژی در هر تپ سیگنال بر حسب انرژی دمشی ورودی به ازای ضرایب بازتابندگی آینه خروجی ۳۰٪ و ۵۰٪..... ۷۸
- شکل (۳-۲۸): پهنای تپ سیگنال بر حسب انرژی دمشی ورودی به ازای ضرایب بازتابندگی آینه خروجی ۳۰٪..... ۷۹
- شکل (۳-۲۹): رفتار زمانی تپ سیگنال در طول موج ۱۵۷۰ NM به ازای انرژی دمش ورودی ۹ J و بازتابندگی آینه خروجی ۳۰٪..... ۷۹
- شکل (۳-۳۰): رفتار زمانی تپ سیگنال در طول موج ۱۵۷۰ NM به ازای انرژی دمش ورودی ۴ J و بازتابندگی آینه خروجی ۳۰٪..... ۷۹
- شکل (۳-۳۱): رفتار زمانی تپ لیزر کلیدزنی شده Q در طول موج ۱۰۶۴ NM به ازای انرژی دمش ورودی ۹ J و بازتابندگی آینه خروجی ۳۰٪..... ۸۰
- شکل (۳-۳۲): رفتار زمانی تپ لیزر کلیدزنی شده Q در طول موج ۱۰۶۴ NM به ازای انرژی دمش ورودی ۴ J و بازتابندگی آینه خروجی ۳۰٪..... ۸۰
- شکل (۳-۳۳): نمایه عرضی سه بعدی پرتو لیزر..... ۸۱
- شکل (۳-۳۴): نمایه عرضی دو بعدی پرتو لیزر..... ۸۱
- شکل (۳-۳۵): نمایه عرضی یک بعدی پرتو لیزر در راستای محور X..... ۸۱
- شکل (۳-۳۶): نمایه عرضی یک بعدی پرتو لیزر در راستای محور Y..... ۸۲
- شکل (۳-۳۷): نمایه عرضی یک بعدی IOPO در راستای محور X..... ۸۲
- شکل (۳-۳۸): نمایه عرضی یک بعدی IOPO در راستای محور Y..... ۸۲
- شکل (۳-۳۹): انرژی تپ سیگنال بر حسب انرژی دمشی به ازای ضرایب بازتابندگی آینه خروجی ۵۰٪ (خط پیوسته داده‌های نظری و نقاط پراکنده داده‌های تجربی)..... ۸۴
- شکل (۳-۴۰): فرآیند تولید تپ سیگنال، برای Nd:YAG/KTP IOPO کلید زنی شده‌ی فعال الکتروآپتیکی دمش توسط لامپ درخشی به ازای انرژی دمش ورودی ۷ ژول و فرکانس تکرار تک هرتز..... ۸۵

فهرست جداول

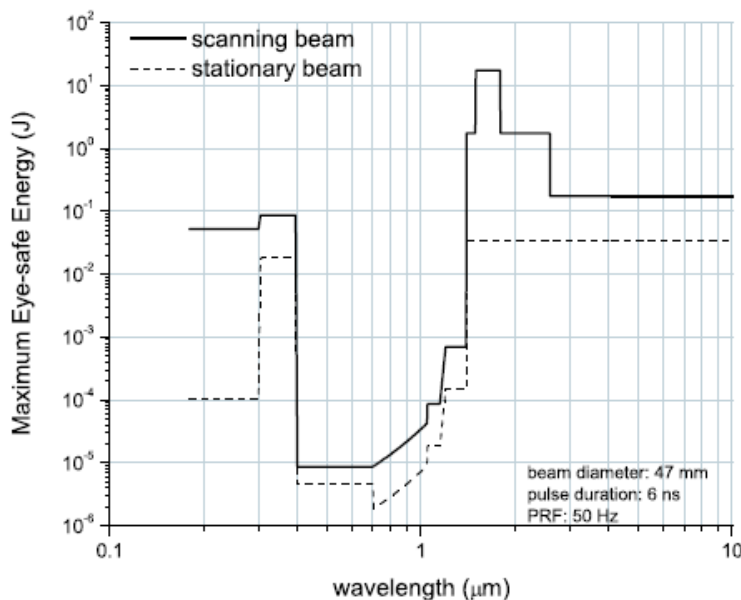
صفحه	عنوان
۳	جدول (۱-۱): مشخصات کلاس I برای چند لیزر مختلف.....
۷۳	جدول (۱-۳): پارامترهای نظری برای شبیه سازی IOPO کلید زنی شده فعال آکستوآپتیکی دمش از پهلوی میانی لیزر نیم رسانا.....
۸۵	جدول (۲-۳): پارامترهای نظری در نظر گرفته شده برای شبیه سازی IOPO کلید زنی شده الکتروآپتیکی با دمش توسط لامپ درخشی.....

فصل اول: تابش لیزر در محدوده چشم ایمن

۱-۱- ایمنی چشم

لیزرها به دلیل جهت‌مندی و چگالی توان بالائی که دارند، به صورت یک لکه‌ی کوچک با چگالی توان بالا بر روی شبکه‌ی چشم کانونی می‌شوند و آسیب‌هایی جدی بر روی آن ایجاد می‌کنند، که هرگز بهبود نمی‌یابد.

در هر طول موجی، اگر انرژی لیزر از حد معینی (به ازای یک اندازه‌ی پرتو و زمان دریافت خاص) تجاوز کند، امکان تخریب بینائی وجود دارد. این حد معین را MPE (بیشینه دریافت مجاز نور^۱) می‌نامند، که میزان آن به طول موج لیزر و عبور طیفی چشم بستگی دارد. شکل (۱-۱) بیشترین انرژی ایمنی چشم را برای یک تپ لیزری بر حسب طول موج نشان می‌دهد [۱].



شکل (۱-۱): بیشترین انرژی ایمنی چشم بر حسب طول موج برای پرتوهای ساکن و در حال روبش

همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، نواحی طیفی مرئی و فروسرخ نزدیک (۴۰۰-۱۴۰۰nm) دارای کمترین انرژی تابش لیزری مجاز برای چشم می‌باشند، زیرا قسمت‌های جلویی چشم مانند عدسی و قرنیه در این طول موج‌ها دارای عبوردهی بالائی می‌باشند و تابش را در این نواحی طول موجی به صورت یک لکه کوچک (از مرتبه ۲۰-۱۰ μm) با چگالی انرژی بالا بر روی شبکه کانونی می‌کنند. بنابراین در این نواحی طول موجی مقادیر کم انرژی نیز باعث تخریب شبکه می‌شود. برای افزایش ایمنی چشم در این نواحی طول موجی دو راه حل وجود دارد، یکی از

۱- Maximum permissible exposure

آن‌ها افزایش گستردگی پرتو به منظور کاهش چگالی انرژی به زیر بیشینه مقدار دریافت مجاز نور و دیگری استفاده از تپ‌های کم انرژی در آهنگ تکرارهای بالا می‌باشد.

در نواحی طول موجی فرابنفش ($<400\text{nm}$) و فرورسرخ نزدیک ($>1400\text{nm}$) امکان دسترسی به بیشترین انرژی که برای چشم بی‌خطر است، وجود دارد. تابش در طول موج‌های بین ۱۵۰۰ تا ۱۸۰۰nm به طور قابل توجهی در سیال بصری و زجاجیه‌ی چشم جذب شده و انرژی که به شبکه می‌رسد، شدیداً تضعیف می‌شود. بنابراین تابش در این نواحی طول موجی دارای بیشترین انرژی مجاز برای چشم می‌باشد. تابش در طول موج‌های بین ۱۴۰۰ تا ۱۵۰۰nm و بالای ۱۸۰۰nm و همچنین تابش در ناحیه‌ی فرابنفش شدیداً در قسمت‌های جلویی چشم جذب می‌شوند و ممکن است باعث تخریب این قسمت‌ها شوند، بنابراین بیشینه دریافت مجاز نور آن‌ها نسبت به طول موج‌های بین ۱۵۰۰ تا ۱۸۰۰nm کاهش می‌یابد (در طول موج‌های بین ۱۴۰۰ تا ۱۵۰۰nm و بالای ۱۸۰۰nm، MPE به میزان یک مرتبه و در ناحیه‌ی فرابنفش تا میزان دو مرتبه کاهش می‌یابد).

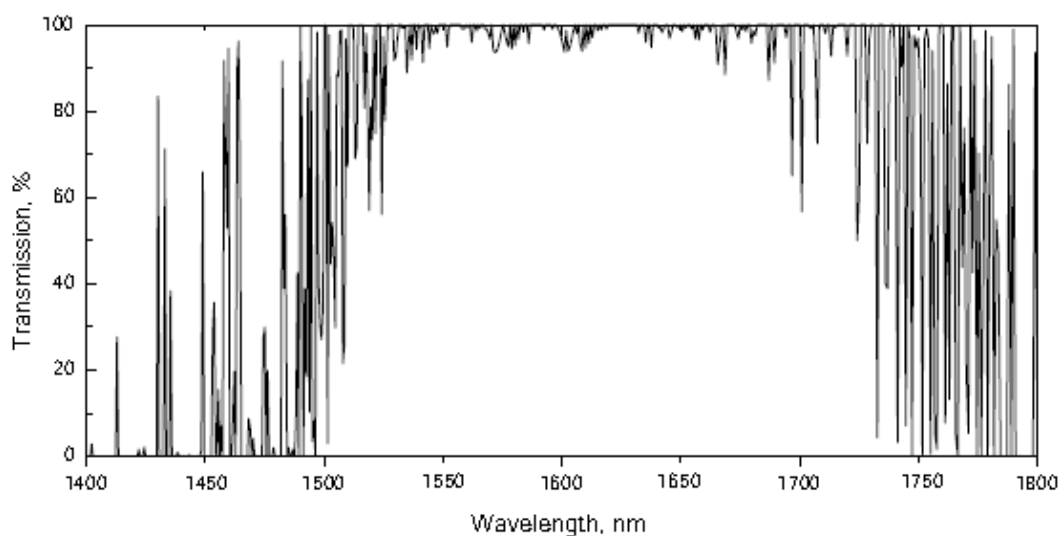
لیزرها را براساس بیشینه دریافت مجاز نور یعنی بیشینه میزانی که در آن چشم یا پوست می‌تواند بدون صدمه در معرض تابش لیزر قرار گیرد، از کلاس I تا کلاس IV دسته‌بندی می‌کنند. لیزرهای کلاس I به طور کامل ایمن هستند و می‌توان آن‌ها را بدون نیاز به هر گونه اقدام محتاطانه‌ای استفاده کرد. جدول (۱-۱) مشخصات کلاس I را برای لیزرهای مختلف نشان می‌دهد [۲]. در این شکل مشاهده می‌شود که یک پرتو در طول موج $1/57\mu\text{m}$ از بقیه‌ی طول موج‌ها ایمن‌تر است. بیشینه انرژی کلاس I برای لیزر در این طول موج به قدری بزرگ است، که می‌توان توسط آن عمل فاصله‌یابی را تا فواصل ۱۰km به خوبی انجام داد.

جدول (۱-۱): مشخصات کلاس I برای چند لیزر مختلف

$\lambda(\mu\text{m})$	Laser	energy level - Class I (μJ)
0.532	(SHG)YAG:Nd	≤ 2.0
0.694	Ruby	≤ 2.0
0.65-0.45	Dye	≤ 2.0
1.06	YAG:Nd	≤ 0.2
1.57	Glass:Er	≤ 8000
10.6	Co ₂	≤ 80

به دلیل این که بیشتر کاربردهای لیزر چشم ایمن به صورت زمین به هوا یا هوا به هوا می‌باشند، برای انتخاب طول موج مناسب باید گذردهی اتمسفر را نیز در نظر گرفت. بنابراین باید طیف جذبی عناصر تشکیل‌دهنده‌ی اتمسفر مانند مولکول‌های هوا و گازهای هم‌چون ازن، بخار آب و دی اکسید کربن را داشته باشیم. شکل (۱-۲) میزان عبوردهی

یک اتمسفر استاندارد را برای طول مسیر ۱km نشان می‌دهد [۳]. جذب بخار آب در نواحی طیفی ۱۴۰۰ تا ۱۵۳۰nm و ۱۷۰۰ تا ۱۸۰۰nm می‌باشد. جذب تابش توسط CO_2 نیز در ناحیه‌ی طیفی بین ۱۵۳۰ تا ۱۶۰۰nm است. البته خطوط جذبی CO_2 در ناحیه‌ی طول موجی ۱۴۳۰nm نیز یافت می‌شود. اما از خطوط جذبی با استفاده از لیزرهایی با پهنای خط بسیار کم (کمتر از صدها نانوثانیه)، که به طور دقیق در یک طول موج کوچک شده‌اند و توسط این طول موج‌ها جذب نمی‌شوند، می‌توان اجتناب نمود.



شکل (۱-۲): میزان عبوردهی اتمسفر استاندارد برای طول مسیر ۱km

۲-۱- روش‌های تولید لیزر چشم ایمن

چندین روش معمول برای تولید تابش لیزری در ناحیه‌ی طول موجی چشم ایمن عبارتند از: استفاده از لیزرهای حالت جامد، مانند اربیم (Er)، استفاده از سلول‌های رامان القائی و استفاده از نوسانگرهای پارامتریک اپتیکی (OPO). در ادامه مزایا و معایب هر یک از این روش‌ها را بیان می‌کنیم.

پراکندگی رامان القائی در جامداتی مانند YVO_4 , β و در گازهایی مانند متان و دوتریوم، تولید تابش در ناحیه‌ی طول موجی حدود ۱۵۴۰nm با کارائی تبدیل بالا و طول پالس‌های کوتاه می‌کند، مبدل‌های رامان برای دست‌یابی به تبدیل فرکانسی بالا نیازی به پرتوهای دمشی با کیفیت بالا ندارند. اما همراه با این روش مشکلات اساسی مانند کیفیت ضعیف پرتو، آهنگ‌های تکرار محدود و نیاز به تعمیر و نگهداری دائمی سلول رامان وجود دارد. البته این مشکلات با استفاده از طراحی‌های پیشرفته‌ای که صورت گرفته تا حدودی برطرف شده است [۴، ۵]. در این طراحی‌ها

با بهینه سازی محفظه‌ی سلول رامان و کاواک دمش، به واگرایی پرتو قابل قبول ($M^2 < 6$) و پهنای طیفی باریک (210MHz) دست یافته‌اند. اما مشکلات دیگر لیزرهای رامان، کارایی اپتیکی پائین و چگالی توان آستانه‌ی خیلی بالای آن‌ها می‌باشد. از طرف دیگر مبدل‌های رامان در یک ناحیه‌ی طیفی خیلی باریک (حدود یک نانومتر) کوک پذیرند. در ضمن سلول‌های رامان دارای گازهای قابل انفجار فشرده هستند و دارای ابعاد بزرگ و سنگین نیز می‌باشند.

لیزرهای حالت جامد مانند Er:glass که طیف نوری نزدیک 1500nm را گسیل می‌کنند، دارای ماده‌ی فعالی کم بهره با کارایی تبدیل پائین از چند درصد تا حدود 12% می‌باشند. اما امتیاز ویژه‌ی استفاده از لیزرهای حالت جامد نسبت به روش‌های دیگر کیفیت پرتوی بهتر آن‌ها می‌باشد، که توسط یک مشدد مناسب به خوبی قابل کنترل می‌باشد. مشکل اصلی لیزرهای Er که توسط لامپ درخشی دمیده می‌شوند، اثرات گرمائی بالا در ماده‌ی فعال آن‌ها است، که منجر به محدود شدن آهنگ تکرار آن‌ها به چند هرتز می‌شود. لیزرهای Er:glass دمش دیودی با کارایی بالا نیز ارائه شده‌اند [۶، ۷، ۸]. اما آن‌ها هم دارای توان‌های قله‌ی نسبتاً پائین می‌باشند. علاوه بر این برای این ناحیه‌ی طول موجی کلیدزنی‌های Q فعال یا غیر فعالی که به طور اقتصادی قابل دسترس باشند نیز وجود ندارد.

امروزه بهترین روش برای تولید لیزرهای چشم ایمن تپی، استفاده از OPOهای است که توسط لیزر نئودیموم دمیده شده‌اند. امتیازات اصلی چنین لیزرهای عبارتند از:

- امکان کوک پذیری دقیق و کنترل طول موج سیگنال
- شدت‌های آستانه‌ی پائین در مقایسه با لیزرهای رامان
- اثرات گرمائی نسبتاً پائین در مقایسه با لیزرهای Er
- امکان دسترسی به گستره‌ی وسیعی از بلورهای غیر خطی به لحاظ اقتصادی
- امکان دسترسی به لیزرهای دمشی مناسب
- کارایی بالا، نزدیک حد کوانتومی
- امکان دستیابی به آهنگ‌های تکرار بالا

در اوایل، OPOها بر اساس فناوری لامپ درخشی ساخته می‌شدند. اما در دهه‌های اخیر لیزرهای OPO دمش دیودی، توجه نسبتاً زیادی را در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی و شرکت‌های تجاری به خود جلب کرده‌اند.

برای چنین هدف خاصی دو نوع OPO چشم ایمن توسعه یافته‌اند:

- نوسانگرهای پارامتریک اپتیکی خارج کاواکی تک تشدید^۲ (EOPO)
- نوسانگرهای پارامتریک اپتیکی داخل کاواکی تک تشدید^۳ (IOPO)

در نوسانگرهای پارامتریک اپتیکی داخل کاواک (IOPO)، که در آن کاواک OPO داخل مشدد لیزری قرار گرفته است، به دلیل چگالی توان بالای پرتو پایه داخل کاواک OPO و طول اندرکنش مؤثر بالا (به واسطه عبور چندگانه پرتو دمش داخل کاواک OPO) دارای آستانه‌ی پائین‌تر و کارایی بالاتری نسبت به نوسانگرهای پارامتریک اپتیکی خارج کاواک (EOPO) می‌باشند [۹]. علاوه بر این نوسانگرهای پارامتریک اپتیکی داخل کاواک دارای برپائی ساده‌تر و ساختار فشرده‌تری نسبت به نوسانگرهای پارامتریک اپتیکی خارج کاواک می‌باشند. بنابر دلایل فوق ما برای تولید لیزر در ناحیه‌ی طول موجی چشم ایمن از نوسانگرهای پارامتریک اپتیکی داخل کاواک استفاده می‌کنیم.

مهم‌ترین عامل برای فراهم کردن یک OPO، بالا بودن شدت قله‌ی لیزر دمش می‌باشد [۱۰-۱۲]. زیرا با افزایش شدت میدان، کارایی جفتیدگی غیرخطی افزایش می‌یابد. بنابراین با استفاده از لیزرهای تپی به عنوان منبع دمش OPOها می‌توان به کارایی جفتیدگی غیرخطی بالاتری دست پیدا کرد. برای دستیابی به لیزر دمش با توان قله‌ی بالا و تپ‌های کوتاه، استفاده از یک کلید زن Q با کیفیت بالا، ضروری می‌باشد. یک لیزر که به طور فعال کلید زنی شده باشد، دارای قدرت تولید قله‌ی توان بالا است. بنابراین ما نیز در این پایان‌نامه از یک لیزر کلیدزنی شده‌ی Q فعال به عنوان منبع دمش OPO استفاده می‌کنیم.

۳-۱- نوسانگرهای پارامتریک اپتیکی نانوآنیه‌ای

در بین تمام شرایط کاری مختلف نوسانگرهای پارامتریک اپتیکی (پیوسته، نانوآنیه، پیکوآنیه و فمتوآنیه) نوسانگرهای پارامتریک اپتیکی نانوآنیه‌ای توسعه‌ی بیشتری یافته‌اند [۱۳]. دلیل اصلی آن میزان دسترسی به پالس‌های دمش پرنرژی (از مرتبه‌ی چند صد میلی ژول) با طول پالس‌های کوتاه (از مرتبه‌ی ۲۰-۱۰ نانوآنیه) می‌باشد، که منجر به دستیابی به توان‌های قله‌ی دمش در گستره‌ی مگاوات می‌شود و در بلورهای غیرخطی تولید بهره‌ی بالا می‌کند. بنابراین در این نوع OPOها کاواک OPO نیاز به فاکتور کیفیت بالا ندارد، در نتیجه OPO به تلفات داخل کاواک خیلی حساس نیست و حتی بلور می‌تواند یکی از طول موج‌های سیگنال و ایدلر را جذب کند. برای مثال در بلور KTP میدان ایدلر در طول موج $339\mu\text{m}$ کاملاً در بلور جذب می‌شود و در نتیجه OPO پالس سیگنال پرشدتی را در طول

^۲- extracavity optical parametric oscillator

^۳- Intracavity optical parametric oscillator

موج $1.57\mu\text{m}$ تولید می‌کند. در ضمن به دلیل عدم حساسیت OPO به تلفات، جورشدهگی مد ناکامل و عدم تراز بودن کامل بلور در داخل کاواک نیز مشکل زیادی ایجاد نمی‌کند. در این نوع OPOها میزان بهره به اندازه‌ی کافی بالا هست که همواره قادر به پایدار نگه داشتن کاواک باشد، بنابراین می‌توان از ساده‌ترین شکل‌های کاواک همچون کاواک تخت-تخت نیز استفاده نمود. در ضمن کارائی تبدیل در OPOهای نانوثانیه‌ای بسیار بالا می‌باشد. در این پایان‌نامه طراحی نظری بر اساس تپ سیگنال خروجی نانوثانیه صورت گرفته و در برپائی تجربی نیز به تپ سیگنال نانوثانیه دست یافته‌ایم.

۱-۴- تاریخچه معادلات آهنگ برای تحلیل نوسانگرهای پارامتریک اپتیکی

معادلات آهنگ ابزار بسیار مفیدی برای تجزیه و تحلیل لیزرهای IOPO می‌باشند. اولین بار Falk ، یک مدل عمومی را فرمول‌بندی کرد که در آن احتمال کلیه‌ی نوسانات ذاتی درون سیستم‌های لیزری در نظر گرفته شده بود [۱۴]. در سال ۱۹۹۸ یک مدل ساده که قادر به توصیف IOPO های کلیدزنی شده‌ی Q بود، توسط Debuisschert ارائه شد [۱۵]. بعد از آن Xiao مدل خاص‌تری از IOPO های کلیدزنی شده‌ی غیر فعال Q را ارائه کرد [۱۶]. در سال ۲۰۰۱ Debuisschert دینامیک IOPO ها را توسط محاسبه‌ی چگالی‌های فوتونی، توسط روش تکرار تجزیه و تحلیل کرد [۱۷]. در سال ۲۰۰۵ Peng مدل Xiao را با در نظر گرفتن تلفات پراش ناشی از اثرات گرمائی اصلاح نمود [۱۸]. در سال ۲۰۰۷ Wang یک مدل کامل‌تر و صحیح‌تر نسبت به مدل‌های قبل را برای توصیف IOPO ها با در نظر گرفتن توزیع فضائی گاوسی برای چگالی‌های فوتونی داخل کاواک ارائه کرد [۱۹]. در این پایان‌نامه نیز از معادلات آهنگ برای تجزیه و تحلیل لیزر IOPO استفاده می‌کنیم.

۱-۵- کاربردها

در سال‌های اخیر، منابع لیزری در ناحیه‌ی طول موجی چشم ایمن ($1.6\mu\text{m}$ - $1.5\mu\text{m}$) به دلیل کاربردهای گسترده‌ای که در زمینه‌های مختلف دارند، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در ادامه به چند مورد از این کاربردها اشاره کرده‌ایم.

۱-۵-۱- آموزش نظامی

آموزش به فرآیندهائی گفته می‌شود که در آن گروهی خاص را از مجموعه‌ای از مهارت‌ها بهره‌مند می‌سازند و به دست آوردن مهارت‌ها در آن توسط وادار کردن آن‌ها به انجام یک کار واقعی یا انجام کاری مشابه کار واقعی صورت می‌پذیرد. هر چند انجام کار واقعی همواره ترجیح داده می‌شود، اما عوامل بسیاری وجود دارند که این هدف را غیر

عملی می‌سازند. به عنوان مثال گروه‌های اجرای قانون نظامی و غیرنظامی باید استفاده از اسلحه‌های خود را آموزش دهند. اما اغلب ویژگی‌های اسلحه‌های‌شان، همچون هزینه و میزان دسترسی به امکانات مناسب، استفاده از نوعی شبیه‌سازی را به آن‌ها تحمیل می‌کند. شبیه‌سازی برای هر نوع آموزش به عنوان یک وسیله‌ی تقریباً شکل یافته پیشرفت کرده است. امتیازات فراوان این فن‌آوری، این شکل از آموزش را مناسب و واقعی ساخته است. در صورتی که شبیه‌سازی به طرز مناسبی صورت پذیرد، هزینه‌های آموزش را کاهش و در بسیاری از شرایط اثربخشی آن را افزایش می‌دهد [۲۰].

بسیاری از سیستم‌های نظامی و سلاح‌ها (به ویژه بعضی از موشک‌ها) بسیار مفید و پرکاربرد می‌باشند، اما به کارگیری آن‌ها بسیار گران قیمت است و نمی‌توان به سادگی، استفاده‌ی کافی از این مهمات گران قیمت را برای آموزش مهارت‌ها، به نیروهائی که اغلب در حال تغییرند، فراهم نمود. در واقع شبیه‌سازی تنها جایگزین مناسب، به جای آموزش، توسط استفاده‌ی مستقیم از سیستم‌ها و سلاح‌های گران قیمت می‌باشد. علاوه بر این همراه با استفاده از بسیاری از این سیستم‌ها و سلاح‌ها یک خطر ذاتی وجود دارد، که استفاده از آن‌ها را مخصوصاً در زمان صلح و تنها برای هدف آموزش نامناسب می‌سازد. بنابراین در گذشته برای آموزش بسیاری از نیروهای نظامی و شبه نظامی، توانائی به کارگیری و سنجش مؤثر یک نیرو در برابر دیگری یک مشکل به نظر می‌رسیده که امروزه به طور مناسبی توسط فن‌آوری شبیه‌سازی حل شده است.

اما لیزرهای چشم ایمن نقش بسیار مهمی را در این نوع شبیه‌سازی‌ها ایفا می‌کنند. در حال حاضر از این نوع لیزرها به عنوان جایگزینی برای لیزرهای غیر چشم ایمن و به منظور تعیین فاصله تا هدف و تعیین مشخصات هدف، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش سیگنالی که از مهمات برگردانده می‌شود، به جایی غیر از محلی که سیگنال ورودی از آن ارسال شده است، فرستاده می‌شود. بنابراین در این روش مکانی که سیگنال برگردانده شده از مهمات را دریافت می‌کند، قابل شناسائی نمی‌باشد و به همین دلیل روشی کاملاً بی‌خطر است.

۱-۵-۲- ارتباطات لیزری

ارتباطات لیزری یکی از بهترین اشکال ارتباطی قابل دسترس در زمان حاضر می‌باشد. این نوع از کانال‌های ارتباطی به دلیل واگرائی کم پرتو لیزر، دارای احتمال قطع پائین (LPI) می‌باشند [۲۱]. علاوه بر این طول موج کوتاه حامل‌ها، پهنای باند را افزایش می‌دهد. این کانال‌ها همچنین از قید منابع تداخل الکترومغناطیسی که در فرکانس‌های رادیویی ایجاد نوفه می‌کنند، رها می‌باشند.

اگر چه ارتباطات لیزری که توسط کابل‌های فیبر اپتیکی هدایت می‌شوند، حدود چند سال است که مورد استفاده قرار می‌گیرند و برای کاربردهای هوا به هوا نیز عملی شدن استفاده از ارتباطات لیزری فضای باز در اواسط ۱۹۸۰ ثابت شده است، اما سازمان‌های عملیاتی نظامی تمایلی نسبت به پذیرش ارتباطات لیزری ندارند. بیشترین علت عدم تمایل آن‌ها به دلیل پایین بودن ایمنی چشم ارتباطات لیزری است. بنابراین لیزرهای چشم ایمن دارای اهمیت ویژه‌ای در ارتباطات لیزری می‌باشند.

۱-۵-۳- لیدار

ایروسل‌های اتمسفر که هم از منابع طبیعی و هم از مداخله‌های انسانی سرچشمه می‌گیرند، به طور قابل ملاحظه‌ای بر میزان تابش زمین تأثیر می‌گذارند و بنابراین نقش مهمی را در تغییرات کلی آب و هوا ایفا می‌کنند. شناخت توزیع فضائی و زمانی ایروسل‌های اتمسفر، اطلاعات اساسی مورد نیاز را برای مطالعات کیفی هوا فراهم می‌کند. از آن جایی که غلظت و نوع ایروسل‌ها در زمان و مکان شدیداً قابل تغییرند، اندازه‌گیری ویژگی‌ها و توزیع‌شان دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد و توسط آن‌ها می‌توان به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیائی اتمسفر پی برد.

آشکارسازی و فاصله‌یابی نور (لیدار)، یک فناوری دورحسی اپتیکی فعال است، که امکان اندازه‌گیری‌های کمی از متغیرهای اتمسفر و تصویربرداری فعال از ساختار اتمسفر را فراهم می‌کند. لیدارها با فرستادن پالس‌های کوتاه لیزری داخل اتمسفر، تابش پس پراکنده شده از مولکول‌ها و ذرات ایروسل را آشکار می‌کنند.

لیدارهای پس براکنش قادرند به طور پیوسته تصاویر ۲ تا ۴ بعدی از اتمسفر را با دوره‌های زمانی چند ساعت تا چند روز فراهم کنند و نواحی با مساحت ده‌ها کیلومتر را پوشش دهند. لیدارها ضمن این‌که در تمامی جنبه‌های علم اتمسفر مشارکت دارند، به طور خاص در مطالعه‌ی لایه‌ی مرزی اتمسفر (ABL) مفید می‌باشند [۲۲]. لایه‌ی مرزی اتمسفر پائین‌ترین لایه‌ی تروپوسفر (نزدیک‌ترین لایه به سطح زمین) است و آن‌را به عنوان قسمتی از سطح زمین که مستقیماً از سطح زمین تأثیر می‌پذیرد، تعریف کرده‌اند [۲۳]. عمق لایه‌ی مرزی اتمسفر تأثیر زیادی در کیفیت هوا دارد و در صورتی که عمق آن کم باشد، ذرات آلوده‌کننده را به دام انداخته و در نتیجه باعث کاهش کیفیت هوا می‌شود.

لیدارهای پس براکنش کشسان برای استفاده در سکوه‌های هوابرد نیز مفید می‌باشند. اغلب لیدارهای کشسان هوابرد در هواپیماهای تحقیقاتی و به منظور تعیین محل لایه‌های ایروسل تروپوسفر و استراتوسفر بالای لایه‌ی مرزی اتمسفر مورد استفاده قرار می‌گیرند و اطلاعات آن‌ها برای جهت‌گیری دوباره‌ی هواپیماها و به منظور شبیه‌سازی موقعیت به کار گرفته می‌شود.