بِسْمِ ٱللَّهِ ٱلرَّحْمَـٰنِ ٱلرَّحِيمِ

١٠٢٨٠٥

دانشگاه شیراز

دانشکده علوم

پایان‌نامه دکتری در رشته‌ی فیزیک (اپتیک و لیزر)

بررسی اثرات گرمایی در لیزرهای حالت جامد و فیبری

توسط

محمد صبائیان

واحد اطلاعات و مدارک علمی

استاد راهنما:

دکتر حمید نادگران

۱۳۸۷ /۵/ ۲۸

فروردین ۱۳۸۷

۱۰۲۸۰۵

بنام خدا

بررسی اثرات گرمایی در لیزرهای حالت جامد و فیبری

به‌وسیله‌ی

محمد صبائیان

پایان‌نامه

ارایه شده به تحصیلات تکمیلی به‌عنوان بخشی از فعالیت‌های تحصیلی لازم برای اخذ درجه دکتری

در رشته‌ی:

فیزیک (اپتیک و لیزر)

از دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی شده توسط کمیه دفاع با درجه: عالی

دکتر حمید نادگران دانشیار بخش فیزیک (استاد راهنما، رئیس کمیته).....

دکتر رضا مسعودی دانشیار پژوهشکده لیزر، دانشگاه شهید بهشتی تهران.....

دکتر محمود مرادی استاد بخش فیزیک.....

دکتر عبدالناصر ذاکری استاد بخش فیزیک.....

دکتر محمد مهدی گلشن استادیار بخش فیزیک.....

دکتر محمود حسینی فرزاد استادیار بخش فیزیک.....

فروردین ۱۳۸۷

تقدیم به پدرم، مرحوم غلامرضا صبانیان

اسوه تلاش، صداقت و مهربانی

اولین معلم من در پیمودن راه سخت و پرپیچ و خم زندگی با سرفرازی و بی نیازی

اگر چه او اکنون نیست تا دستان پینه بسته اش را به پاس زحمات و امیدواری هایش ببوسم

ولی در لحظه لحظه نگارش این رساله یادش و آموخته هایش برایم توان مضاعفی بود تا آنچه را ثمره بیست و دو سال تحصیل و تلاشم بود،

آهسته و پیوسته بنویسم و به او تقدیم کنم.

روحش شاد باد و یادش گرامی

تقدیم به خانواده ام؛ همسر و دخترم به خاطر تحمل سختی ماهها دوری و نبودم در خانه

و تقدیم به آفتاب مهربانی، مادرم؛ به پاس سالها بذل محبت و خوشبختی

و تقدیم به تمامی معلمانم از اولین روزهای مدرسه تا به امروز، آخرین روزهای دانشجویی

سپاسگزاری

اکنون که این پایان‌نامه به پایان رسیده است بر خود واجب می‌دانم از همه کسانی که بنده را در انجام آن یاری داده‌اند تشکر و قدردانی کنم. تشکر ویژه خود را از جناب آقای دکتر حمید نادگران به خاطر زحمات بی‌دریغ‌شان در مدت شش سال دوره کارشناسی ارشد و دکتری اعلام می‌دارم. همچنین از جناب آقای دکتر رضا مسعودی که داوری این رساله را بر عهده داشتند و بنده را از راهنمایی خود محروم نساختند، تشکر و قدردانی می‌کنم. از جناب آقای دکتر عبدالناصر ذاکری به خاطر سال‌ها تلاش در امر تدریس به اینجانب و همچنین به‌خاطر مطالعه و داوری این رساله تقدیر و تشکر می‌کنم. از آقایان دکتر محمد مهدی گلشن، دکتر محمود مرادی و دکتر محمود حسینی فرزاد نیز به خاطر مطالعه این رساله و راهنمایی‌هایی ارزنده‌شان تشکر و قدردانی می‌کنم. از جناب آقای پروفسور فرانچسکو پرودنزانو، پروفسور مارچلو دی‌ساریو و دکتر لوچانو مشا از دانشگاه پلی‌تکنیک باری ایتالیا به خاطر فراهم نمودن فرصت مطالعاتی در آن دانشگاه تشکر و قدردانی می‌کنم. همچنین از همسر خود به خاطر همکاری در تایپ و کمک در انجام برخی محاسبات تشکر و قدردانی می‌نمایم. تشکر خود را از دوست گرامی جناب آقای دکتر پرویز الهی به خاطر راهنمایی‌هایشان اعلام می‌دارم.

چکیده

بررسی اثرات گرمایی در لیزرهای حالت جامد و فیبری

به‌وسیله:

محمد صبائیان

در این رساله اثرات گرمایی بر روی سیستم‌های مختلف اپتیکی و لیزری بررسی شده است. در این رابطه ابتدا معادله گرما در حالت کلی همراه با جواب‌ها و شرایط مرزی و اولیه آن ثابت گردیده است. سپس منابع تولید گرما در سیستم‌های مختلف فیزیکی به‌طور جامع مورد بحث قرار گرفته‌اند.

پاشندگی گرمایی و اثر انتها در لیزرهای جامد Ti:Sapphire تحت دمش پالس‌های سوپرگاوسی مورد تحقیق قرار گرفته و با مدل‌های قبلی مقایسه گردیده است. هم‌چنین واقطبیدگی گرمایی در لیزرهای جامد تحت دمش پالس‌های سوپرگاوسی بررسی شده و نتایج به کریستال‌های Nd:YAG و $Nd:GdVO_4$ اعمال گردیده است. در این رابطه لازم بوده است که برای اولین بار عبارت دوشکستی گرمایی-القایی $n_r - n_\phi$، که n_r ضریب شکست در راستای شعاع و n_ϕ ضریب شکست در راستای زاویه سمتی است، برای کریستال چهارگوشی $Nd:GdVO_4$ محاسبه گردد. نتایج این قسمت نشان‌دهنده اطمینان مدل است که با حالت‌های cw تجربی هم‌خوانی رضایت‌بخشی دارد.

ارایه یک مدل کاملا تحلیلی برای محاسبه توزیع دما در کریستال‌های لیزری با هندسه مکعبی و تحت شرایط سرمایش از طریق همرفت، از دیگر کارهای انجام‌شده در این رساله است که می‌تواند طراحان کاواک‌های لیزری را از استفاده از تقریب‌هایی که تاکنون در این رابطه انجام داده‌اند، بی‌نیاز سازد.

ابداع یک مدل گرمایی برای بهبود پروفایل پرتوهای بسل-گاوسی از چیدمان آزمایشی هاکولا، کار دیگر مورد بررسی در این رساله است. در این رابطه نشان داده شده است که اعمال مدل گرمایی بر روی مدل معمولی هاکولا، بخوبی نشان‌دهنده اختلاف پروفایل تجربی پرتو بسل-گاوسی با مدل معمولی است.

تاثیر پذیری جدی و غیر قابل اجتناب مودهای عبوری از یک لیزر فیبری از اثرات گرمایی-القایی در این نوع لیزرها، موضوع بحث دیگر این رساله است. در این رابطه یک لیزر فیبری هشت‌وجهی مورد مطالعه قرار گرفته و تغییرات ضریب هم‌پوشانی مغزی آن برای مودهای مختلف مغزی و غلاف محاسبه و رسم گردیده است.

فهرست مطالب

عنوان..... صفحه

فصل اول: مقدمه..... ۲

۱-۱ اثرات گرمایی..... ۲

۱-۲ مروری بر تحقیقات گذشته..... ۷

۱-۳ آنچه در این رساله خواهد آمد..... ۱۲

فصل دوم: معادله گرما، شرایط مرزی و شرایط اولیه..... ۱۴

۲-۱مقدمه..... ۱۴

۲-۲ معادله انتقال حرارت..... ۱۴

۲-۳ شرایط مرزی..... ۱۷

۲-۴ شرایط اولیه..... ۱۹

فصل سوم: منابع تولید گرما در لیزرهای حالت جامد..... ۲۱

۳-۱ مقدمه..... ۲۱

۳-۲ منابع تولید گرما..... ۲۱

فصل چهارم: بررسی پاشندگی گرمایی و اثر انتها در لیزر حالت جامد Ti:Sapphire تحت دمش یک‌طرفه پالس‌های کوتاه سوپرگاوسی مرتبه چهار..... ۲۷

۴-۱ مقدمه..... ۲۷

۴-۲ توزیع دما..... ۲۹

۴-۳ شرایط مرزی و اولیه-جواب نهایی..... ۳۰

۴-۴ دمش پشت‌سرهم-توزیع دما..... ۳۴

۴-۵ اثرات گرمایی..... ۳۷

۴-۵-۱ اثر dn/dT..... ۴۰

۴-۵-۲ اثر انتها..... ۴۰

۴-۶ مقایسه با مدل قبلی..... ۴۲

۴-۷ نتیجه‌گیری..... ۴۴

فهرست مطالب

عنوان .....صفحه

فصل پنجم: واقطبیدگی گرمایی-القایی در لیزرهای حالت جامد تحت دمش پالس کوتاه سوپرگاوسی ۴۷

۵-۱ مقدمه ۴۷

۵-۲ قانون هوک ۴۹

۵-۳ تنش‌ها و کرنش‌های گرمایی ۵۱

۵-۴ شناسه ۵۲

۵-۵ دوشکستی ۵۵

۵-۶ واقطبیدگی ۵۸

۵-۷ نتایج ۵۹

فصل ششم: حل تحلیلی معادله گرما در کریستال مکعبی با دمش طولی یک‌طرفه ۶۶

۶-۱ مقدمه ۶۶

۶-۲ معادله گرما ۶۸

۶-۳ شرایط مرزی و جواب‌ها ۶۸

۶-۳-۱ حالت اول: دمای ثابت و یکسان برای چهار صفحه جانبی ۶۹

۶-۳-۲ حالت دوم: دمای ثابت، یکسان و متفاوت با دمای محیط برای چهار صفحه جانبی ۷۱

۶-۳-۳ حالت سوم: شرط همرفت برای شش وجه ۷۲

۶-۴ نتایج و مقایسه با حل عددی ۷۶

۶-۵ نتیجه‌گیری ۸۱

فصل هفتم: پرتوهای بسل-گاوس: بررسی اثرات گرمایی در تولید آنها ۸۴

۷-۱ مقدمه ۸۴

۷-۳ توزیع دما و محیط GRIN ۸۸

۷-۴ انتقال پرتو در محیط لنز-گونه گرمایی-القایی ۹۱

مدل گرمایی و روش ۹۱

۷-۵ نتایج و بحث ۹۲

۷-۶ نتیجه گیری ۹۵

فهرست مطالب

عنوان.....صفحه

فصل هشتم: بررسی اثرات گرمایی روی خصوصیات مودی لیزر فیبری دوغلافه هشت‌وجهی Yb:Glass پرتوان ۹۷

۸-۱ مقدمه ۹۷

۸-۲ فیبرهای دوغلافه با هندسه خاص ۹۸

۸-۳ توزیع دما ۱۰۳

۸-۴ تغییرات گرمایی-القایی ضریب‌شکست ۱۰۶

۸-۵ شبیه‌سازی مودهای در حال انتشار ۱۰۸

۸-۶ نتایج و بحث ۱۰۹

۸-۷ نتیجه‌گیری ۱۱۶

مراجع ۱۲۱

فصل نهم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۱۸

فهرست جدول‌ها

عنوان و شماره **صفحه**

جدول شماره ۴-۱: خصوصیات گرمایی-اپتیکی $Ti:Al_2O_3$ در دمای اتاق[۹۶] ۴۲
جدول شماره ۵-۱: خواص گرمایی و اپتیکی کریستال‌های Nd:YAG و $Nd:GdVO_4$ در دمای اتاق..... ۶۴

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل۲-۱: یک عنصر مکعبی. ۱۵

شکل ۲-۲: تغییرات رسانندگی گرمایی (K) شیشه سیلیکا بر حسب افزایش دما (ΔT) ۱۶

شکل ۲-۳ یک عنصر کوچک سطح به همراه فرایند های انتقال حرارت رسانش، همرفت و تابش ۱۸

شکل ۳-۱: فرایند فروکش تراکمی. (الف) یون در تراز برانگیخته انرژی خود را به یون مجاور می‌دهد و هر دو در تراز نیمه پایدار میانی قرار می‌گیرند. (ب) سپس هر دو یون از طریق گسیل چند فوتونی به تراز زمینه برمی‌گردند. ۲۲

شکل ۳-۲: فرایند انتقال بالاسوی انرژی. (الف)یکی از دو یون برانگیخته انرژی خود را به یون مجاور می‌دهد. (ب) با این کار یون گیرنده به تراز بالاتر رفته و یون دهنده به حالت زمینه برمی‌گردد. یون گیرنده معمولا بدون گسیل تابش به حالت زمینه برمی‌گردد. ۲۳

شکل ۴-۱: طیف‌های جذبی و فلورسانس یون Ti^{3+} در Al_2O_3 [۹۱]. ۲۸

شکل۴-۲: توزیع شعاعی اختلاف دما با محیط برای پروفایل دمش اولیه سوپرگاوسی با انرژی $E_0 = 0.1j$ در زمان‌های مختلف $t = 0s$(منحنی توپر)، $t = 0.05s$ (منحنی نقطه‌چین)، $t = 0.1s$(منحنی خط‌تیره)، $t = 0.5s$ (منحنی خط‌تیره‌نقطه‌چین) و $t = 1s$ (منحنی دایره). ۳۳

شکل ۴-۳: توزیع سه بعدی دما بعد از تابیدن بینهایت پالس با انرژی $E = 0.1j$ در زمان $t = 0$ (بعد از تابیدن nامین پالس با $n \to \infty$). ۳۵

شکل ۴-۴: توزیع سه بعدی دما بعد از تابیدن بینهایت پالس با انرژی $E = 1j$ در زمان $t = 0$ (بعد از تابیدن nامین پالس با $n \to \infty$). مطابق با این شکل با افزایش انرژی، تغیرات دما در راستای طول کریستال بسیار اندک است. ۳۶

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۴-۵: اختلاف فاز مطلق (منحنی توپر) با استفاده از رابطه (۴-۳۲) و اختلاف فاز در تقریب پرتو پیرامحوری یا اختلاف فاز کروی (منحنی نقطه‌چین) با استفاده از رابطه (۴-۳۳). پارامترهای استفاده شده همان‌هایی هستند که در شکل (۴-۲) استفاده شدند. ۳۸

شکل ۴-۶: اختلاف میان اختلاف‌فاز در تقریب پیرامحوری و فاز واقعی بر حسب 2π . پارامترهای استفاده شده همان‌هایی هستند که در شکل‌های قبل استفاده شدند. ۳۹

شکل ۴-۷: فاصله کانونی ناشی از اثر انتها (منحنی‌های توپر) و ناشی از اثر پاشندگی گرمایی (منحنی‌های نقطه‌چین) برای دو مقدار انرژی قله پالس $E_0 = 0.1j$ (منحنی‌های طرف راست) و $E_0 = 1j$ (منحنی‌های طرف چپ) بر حسب بسامد تکرار پالس. طول کریستال $l = 1cm$ است. سایر پارامترها، a و ω_p ، به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که انرژی یک پالس تاپ‌هت برابر انرژی پالس سوپرگاوسی شود. ۴۰

شکل ۴-۸: فاصله کانونی کل $f = (1/f_{th} + 1/f_{ref})^{-1}$ برای دو مقدار انرژی قله پالس $E_0 = 0.1j$ (منحنی توپر) و $E_0 = 1j$ (منحنی نقطه‌چین) بر حسب بسامد تکرار پالس. سایر پارامترها استفاده شده همان‌هایی هستند که در شکل قبل استفاده شدند. ۴۱

شکل ۴-۹: توزیع دمای شعاعی بر T_0 بر حسب شعاع به‌هنجار برای دمش تاپ‌هت بعد از اتمام پالس اول برای $t = 0s$ (منحنی توپر)، $t = 0.001a^2/\kappa$ (منحنی نقطه‌چین)، $t = 0.01a^2/\kappa$ (منحنی خط‌چین) و $t = 0.1a^2/\kappa$ (منحنی نقطه‌خط چین). ۴۲

شکل ۴-۱۰: اختلاف راه نوری برای پالس‌هایی با انرژی $E_0 = 0.1j$. منحنی توپر مقدار واقعی و منحنی نقطه‌چین قسمت کروی (تقریب پرتو پیرامحوری) این کمیت را مطابق با کار لاسن [۹۳] نشان می‌دهد. ۴۳

شکل ۴-۱۱: قسمت غیر کروی (ابیراهی) اختلاف فاز گرمایی تقسیم بر طول موج لیزر ($\lambda_l = 800nm$) ناشی از اثر پاشندگی گرمایی بر حسب شعاع بهنجار[۹۳]. ۴۴

شکل ۵-۱: جهت رشد کریستال و جهت محورهای اصلی شبکه ۵۶

شکل ۵-۲: جهت نور قطبیده(P) و ضرایب شکست شعاعی و سمتی در هر نقطه (r, ϕ). ۵۸

شکل ۵-۳: واقطبیدگی گرمایی‌القایی بر حسب ϕ برای Nd:YAG تحت تابش پالس‌های با انرژی $E = 10j$ و آهنگ تکرار پالس $f = 10Hz$ در زمان $t = 0s$(سمت راست)، $t = 0.5\tau$ (وسط) و $t = \tau$(سمت چپ). مبدا زمان بعد از اتمام nامین ($n \to \infty$) پالس است. ۶۰

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۵-۴: واقطبیدگی گرمایی‌ـالقایی بر حسب ϕ برای Nd:YAG تحت تابش پالس‌هـای بـا انرژی $E = 10j$ و آهنگ تکرار پالس $f = 50Hz$ در زمـان $t = 0s$(سـمت راسـت)، $t = 0.5\tau$ (وسط) و $t = \tau$(سمت چپ). مبدا زمان بعد از اتمام nامین ($n \to \infty$) پالس است..... ۶۰

شکل ۵-۵: واقطبیدگی گرمایی‌ـالقایی بر حسب ϕ برای Nd:YAG تحت تابش پالس‌هـای بـا انرژی $E = 10j$ و آهنگ تکرار پالس $f = 100Hz$ در زمان $t = 0s$(سـمت راسـت)، $t = 0.5\tau$ (وسط) و $t = \tau$(سمت چپ).مبدا زمان بعد از اتمام nامین ($n \to \infty$) پالس است..... ۶۱

شکل ۵-۶: واقطبیـدگی کـل بـرای کریـستال Nd:YAG تحـت دمـش پیوسـته (دایـره‌هـای توخالی)[۱۰۹] ، دمش پالسی با فرکـانس تکـرار $10Hz$ (نمـودار نقطـه‌چـین)، $50Hz$ (نمـودار خط‌چین) و $100Hz$ (نمودار توپر)..... ۶۱

شکل ۵-۷: تحول زمانی واقطبیدگی کل برای پالس‌های با انـرژی $10j$ و آهنـگ تکـرار پـالس $100Hz$. دایره‌های توخالی مربوط دمش پیوسته هستند، نمودار توپر مربـوط بـه زمـان $t = 0$، نمودار نقطه‌چین مربوط به $t = 0.5\tau$ و نمودار خط‌چین مربوط به زمان $t = \tau$ است..... ۶۲

شکل ۵-۸: توزیع واقطبیدگی گرمـایی‌ـالقـایی بـر حـسب زاویـه سـمتی ϕ بـرای کریـستال $Nd:GdVO_4$ تحت دمش پالس‌های با انرژی $10j$ و فرکانس تکرار پالس $10Hz$ (سمت راست)، $50Hz$ (وسط) و $100Hz$ (سمت چپ). ابعاد فیزیکی کریستال شـبیه Nd:YAG اسـت. سـایر خصوصیات کریستال در جدول ۵-۱ آمده است..... ۶۳

شکل ۶-۱: شمای کریستال مکعبی با پرتوی دمش و پرتو لیزر..... ۶۹

شکل ۶-۲: توزیع دمای سـه‌بعـدی بـرای تـوان دمـش $15W$ در صـفحه $x-y$ در $z = 0$ بـا استفاده از رابطه (۶-۸) برای $m, n = 1, 3, 5, 7, 9$..... ۷۷

شکل ۶-۳: توزیع دمایی در صفحات $z = 0$ و $z = c/2$ در طول محـور x، وقتـی $y = b/2$، برای توان پمپ جذب شده $P = 15W$. نمودار توپر مـدل تحلیلـی مـا بـا $m, n = 1, 3, 5, 7, 9$ و نمودار نقطه‌چین مدل عددی را نشان می‌دهد. در این شکل انطباق خوب مدل تحلیلی با مدل عددی، مانع تمایز بین دو نمودار توپر و نقطه‌چین شده‌است..... ۷۸

شکل ۶-۴: توزیع دما در راستای محور کریستال برای $x = a/2$ و $y = b/2$ برای $15W$ توان دمش جذب شده. منحنی توپر جواب تحلیلی و منحنـی نقطـه‌چـین جـواب عـددی را نـشان می‌دهد..... ۷۹

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۶-۵: توزیع دما در راستای x برای $y = b/2$ در صفحات $z = 0$ و $z = c/2$ با توان دمش $15W$. منحنی توپر مدل تحلیلی و منحنی نقطه‌چین (که به سختی دیده می‌شود) جواب عددی را نشان می‌دهد ۸۰

شکل ۶-۶: توزیع دمای سه بعدی درکریستال برای توان دمش $15W$ در صفحه $x - z$ وقتی $y = b/2$ با استفاده از عبارت (۶-۳۲) ۸۱

شکل ۶-۷: مقایسه بین جواب تحلیلی (منحنی توپر) و جواب عددی (منحنی نقطه‌چین). منحنی‌ها در راستای x وقتی $y = b/2$ در صفحات $z = 0$ و $z = b/2$ و برای توان جذب شده $15W$ رسم شده‌اند ۸۲

شکل ۷-۱: چیدمان هاکولا برای تولید پرتوهای بسل-گاوس[۱۵۷] ۸۶

شکل ۷-۲: فاصله کانونی لنز گرمایی بر حسب توان دمش ۹۲

شکل ۷-۳: از بالا به پایین: توزیع شدت پرتوهای بسل-گاوس در فاصله 0، 2 و $5cm$ از کمر پرتو. منحنی‌های توپر مدل تئوری ما و منحنی نقطه‌چین مدل تئوری هاکولا را نشان می‌دهد. ... ۹۳

شکل ۷-۴: توزیع شدت پرتوهای بسل-گاوس برای میدان دور که $38cm$ از کمر پرتر فاصله دارد. به بیشینه کم شدت که بین دو بیشینه پر شدت اتفاق افتاده است توجه کنید که نتیجه اعمال پروفایل سوپر گاوسی است ۹۳

شکل ۸-۱: فیبر استوانه‌ای (سمت راست) و فیبر نامتقارن D-شکل (سمت چپ). مسیر حرکت پرتو در فیبر استوانه‌ای منظم‌تر و احتمال قطع مغزی کمتر است. این مسیر برای فیبر نامتقارن تصادفی‌تر و احتمال قطع مغزی بیشتر است. ۹۹

شکل ۸-۲: انواع ساختارهای فیبرهای دوغلافه، (الف) مغزی غیرمرکزی [۱۸۲]، (ب) مستطیلی[۱۸۲] ، (ج) D-شکل[۱۸۷] ، (د) ستاره‌ای[۱۸۸] ، (ه) هشت‌وجهی[۱۸۹] و (و) حفره‌دار [۱۹۰] ۱۰۰

شکل ۸-۳: نتایج محاسبات زلمر[۱۸۷] برای بازده جذب فیبر با مقاطع مختلف ۱۰۰

شکل ۸-۴: سطح مقطع جذب و گسیل یون ایتربیوم در شیشه ژرمانیو-آلومینیو سیلیکا[۱۹۲]. ۱۰۲

شکل ۸-۵: سطح مقطع یک فیبر هشت‌وجهی با مغزی، غلاف اول و غلاف دوم. ۱۰۴

شکل ۸-۶: توزیع دما در راستای r برای دو جهت OA و OB نشان‌داده شده در شکل (۸-۵) وقتی گرمای تولید شده $65W$ است ۱۰۵

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۸-۷: دمای مرکز فیبر بر حسب گرمای تولیدی ۱۰۶
شکل ۸-۸: تغییرات ضریب شکست (Δn) بر حسب r برای $65W$ گرمای تولیدی در دو جهت OA و OB..... ۱۰۷
شکل ۸-۹: (a) ضریب‌شکست پله‌ای فیبر بر حسب شعاع قبل از تولید گرما، (b) تغییرات ضریب شکست ناشی از گرما و (c) مقدار مطلق ضریب‌شکست جدید[۱۹۶] ۱۰۸
شکل ۸-۱۰: پروفایل‌های میدان‌های الکتریکی در حال انتشار در مغزی در طول موج لیزر به ترتیب از راست به چپ: مود HE_{11}، مود TE_{01}، مود EH_{21} و مود TM_{01}. پیکان‌ها جهت بردار قطبش را نشان می‌دهند و نقاط تاریک نشان‌دهنده میدان قوی‌تر هستند. ۱۰۹
شکل ۸-۱۱: تغییرات ضریب همپوشانی مغزی بر حسب گرمای تولیدی در فیبر برای مودهای مغزی در طول‌موج لیزر..... ۱۱۰
شکل ۸-۱۲: پروفایل‌های میدان‌های الکتریکی مودهای در حال انتشار در غلاف اول در طول‌موج دمش به ترتیب از راست به چپ: مود HE_{11}، مود TE_{01}، مود EH_{21} و مود TM_{01}. پیکان‌ها جهت بردار قطبش را نشان می‌دهند و نقاط روشن نشان‌دهنده میدان قوی‌تر هستند. ۱۱۱
شکل ۸-۱۳: ضریب هم‌پوشانی مغزی چهار مود خانواده اول غلاف در طول موج دمش..... ۱۱۱
شکل ۸-۱۴: پروفایل بهنجار میدان الکتریکی مود اصلی غلاف (HE_{11}) بدون اثرات گرمایی (خط توپر) و اثرات گرمایی برای $32W$ (منحنی خط‌تیره‌نقطه)، $62W$ (منحنی نقطه‌چین) و $84W$ (منحنی خط‌تیره) در منطقه مغزی. ۱۱۲
شکل ۸-۱۵: پروفایل‌های میدان‌های الکتریکی مودهای خانواده دوم در غلاف اول در طول‌موج دمش به ترتیب از راست به چپ: مود HE_{12}، مود TE_{02}، مود EH_{22} و مود TM_{02}. پیکان‌ها جهت بردار قطبش را نشان می‌دهند و نقاط روشن نشان‌دهنده میدان قوی‌تر هستند. ۱۱۲
شکل۸-۱۶: تغییرات ضریب هم‌پوشانی مغزی برای چهار مود خانواده دوم مودهای غلاف در طول موج دمش..... ۱۱۳
شکل ۸-۱۷: پروفایل‌های میدان‌های الکتریکی مودهای خانواده سوم در غلاف اول در طول‌موج دمش به ترتیب از راست به چپ: مود HE_{13}، مود TE_{03}، مود EH_{23} و مود TM_{03}..... ۱۱۴
شکل ۸-۱۸: تغییرات ضریب هم‌پوشانی مغزی بر حسب گرمای تولیدی برای چهار مود خانواده سوم مودهای غلاف در طول موج دمش. ۱۱۴

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۸-۱۹: دمای مرکز فیبر بر حسب افزایش قطر غلاف پلیمری. ۱۱۵

فصل اول:
مقدمه

۱.مقدمه

۱-۱ اثرات گرمایی

لیزرهای حالت جامد که توسط لیزرهای دیودی از انتها دمیده می‌شوند[1]، نسبت به سیستم‌های دمش از کنار[2]، بازده دمش بالاتری دارند و انتخاب مود در آنها برای تولید لیزرهای تک‌مود و تک قطبش[3]، امکان‌پذیر است [۱]. چون در این سیستم‌ها قسمت مرکزی کریستال دمیده می‌شود، امکان برانگیختن پایین‌ترین مودهای عرضی وجود دارد و خروجی چندمودی[4] است. در حالی که در سیستم دمش جانبی، تمام میله لیزری تحت دمش است و ده‌ها مود برانگیخته می‌شوند [۱]. همچنین در طراحی مشددهای لیزرهای دمش از انتها، طراح آزادی عمل بیشتری دارد و در بازه طول‌موجی وسیع‌تری می‌تواند لیزر را راه‌اندازی کند [۲]. همین مزیت در توان‌های بالا باعث ایجاد اثرات ناخوشایندی در کریستال می‌شود. تمرکز انرژی دمش در منطقه کوچکی اطراف محور کریستال، منجر به تولید گرما و توزیع نایکنواخت دما در میله لیزری می‌شود. مخصوصا اینکه در محل دمش، نسبت به سایر نقاط، اختلاف دما با سطح کریستال بسیار بالاتر است. با توجه به اینکه تابش فلورسانس مکانیسم اصلی تبدیل پرتوهای دمش با طول موج کمتر به پرتوهای لیزری با طول موج بیشتر است، حداقل هفت مکانیسم را می‌توان نام برد که مسئول تولید گرما در این محیط‌ها هستند: بازده کوانتومی کمتر از واحد تراز دمش، ناکارآمدی کوانتومی بین تراز دمش و تراز نیمه‌پایدار، بازده کوانتومی کمتر از واحد تراز نیمه‌پایدار، فروکش تراکمی[5]، انتقال بالاسوی انرژی[6]،

---

[1] Diode end-pumped solid-state lasers
[2] Side-pumped
[3] Single polarization
[4] Multi-mode
[5] Concentration quenching
[6] Energy up-conversion

گرمای همراه با فرایند فلورسانس و گرمای همراه با گسیل القایی [۳]. البته سهم تولید گرما مربوط به هر مورد در مواد مختلف، متفاوت است و گاهی اوقات می‌توان از برخی از آنها صرفنظر کرد.

گرمای تولید شده در محیط‌لیزری برای رسیدن به تعادل گرمایی با محیط اطراف، به طرف مرزهای خنک‌تر حرکت کرده و در آنجا از طریق فرایندهای همرفت و تابش به محیط منتقل می‌شود. این اتفاق باعث ایجاد یک توزیع نایکنواخت دما در محیط لیزری می‌شود. نتیجه توزیع نایکنواخت دما، پاشندگی گرمایی[۷] است که به‌صورت $n = n_0 + \frac{\partial n}{\partial T}\Delta T$ بیان می‌شود، انحنای سطوح کریستال[۸] ـکه گاهی اوقات اثر انتها[۹] نیز نامیده می‌شودـ تنش‌ها و کرنش‌های گرمایی و گاهی اوقات شکستگی کریستال است. هر کدام از موارد بالا، باعث القای اثراتی روی پرتو لیزری می‌شوند. پاشندگی گرمایی به همراه اثر انتهاـکه در واقع از مولفه طولی تنش نشات می‌گیردـ باعث القای اختلاف فاز بین پرتوهای عبوری روی محور کریستال و پرتوهای عبوری از سایر فواصل می‌شوند. در محیط‌های کریستالی جامد، پاشندگی گرمایی شبیه یک عدسی محدب عمل می‌کند. اثر انتها در مواردی که انتهای کریستال لایه‌نشانی شده باشد، مانند یک آینه و در غیر این‌صورت شبیه یک عدسی محدب عمل می‌کند. اهمیت بررسی این موضوع به این دلیل است که این عدسی‌ها و اختلاف فازهای منتج، برای دمش‌های واقعی، کروی نیستند، بلکه دارای ابیراهی‌هایی از مرتبه r^4 و بالاترند. این بدان معناست که این اثرات به‌سادگی با عدسی‌های کروی معمولی جبران نمی‌شوند. قسمتی از این عدسی‌های گرمایی را می‌توان با لنزهای سهموی جبران کرد؛ آنچه که باقی می‌ماند، با افزایش توان دمش، پیچیده‌تر می‌شود. اگر چه اساسا می‌توان قسمت باقی‌مانده را با طراحی قطعات خاص جبران کرد، اما این طراحی پرهزینه است و در ضمن برای هر توانی نیاز به یک نوع طراحی دارد. به هر حال قسمت باقی مانده باعث افت در کاواک می‌شود که با مجذور توان دمش متناسب است[۴]. شکل عدسی گرمایی القاشده، کاملا به پروفیل دمش بستگی دارد. همانطور که می‌دانیم، پروفایل منابع دمش حالت جامد در توان‌های پایین و تک‌مود، گاوسی است. در توان‌های بالا، پروفایل دمش یک تابع سوپرگاوسی مرتبه چهار و یا بالاتر است و خروجی چندمودی است. همانطور که کلارکسون اشاره کرده است [۲]، پروفایل دمش لیزرهای فیبری، همیشه در همه توان‌ها، سوپرگاوسی است. همانطور که در زیرفصل بعدی خواهیم دید، برخی از مولفین برای سادگی در محاسبات و مدل‌سازی از پروفایل‌های تاپ‌هت[۱۰] استفاده کرده‌اند. حل معادله گرما، و پی بردن به مقدار دما و توزیع آن با استفاده از پروفایل تاپ‌هت یک مسئله ساده

---

[7] Thermal dispersion
[8] Surface bending
[9] End effect
[10] Top-hat profile

است، و به همین دلیل نتایج آن گویای تمام واقعیت‌ها نیست. در این مورد، اختلاف‌فاز گرمایی القاشده، سهموی، یعنی تابع مرتبه دومی از شعاع است: $\Delta\varphi \propto r^2$. در برخی موارد، لنز گرمایی القاشده باعث ناپایداری کاواک‌های لیزری می‌شود. در این موارد که در چگالی‌های توان بالا رخ می‌دهد، اثر لنزشدگی عاملی است که باعث تغییر شدید کمرپرتو و جبهه‌موج می‌شود.

از دیگر اثرات گرمایی، دوشکستی القایی در کریستال‌های همسانگرد و تغییر نوع دوشکستی در کریستال‌های ناهمسانگرد است. دوشکستی اثر مستقیم تنش و کرنش گرمایی است. انبساط‌های نایکنواخت ماده لیزری، باعث تغییر خواص نوری ماده مورد نظر می‌شود. در این زمینه، خواص مکانیکی نظیر سختی کریستال و حدشکست، خواص گرمایی نظیر رسانندگی گرمایی و ظرفیت گرمایی ویژه و خواص نوری اولیه که به مواد تشکیل دهنده و ساختار کریستال از نظر بلورشناختی مربوط می‌شوند، از اهمیت بسیار بالایی برخوردارند. دوشکستی باعث واقطبیدگی پرتوهای قطبیده خطی خارج شده از لیزر می‌شود. اهمیت این موضوع زمانی آشکار می‌شود که هدف از طراحی لیزر، تولید یک پرتو قطبیده پرتوان باشد.

نتیجه تمام بحث‌های بالا، کاهش کیفیت پرتو [11] و اعوجاج جبهه‌موج[12] پرتو است. یک لیزر پرتوان با کیفیت خوب برای بسیاری از کاربردهای صنعتی لازم است. مخصوصا برای برش، یک لیزر پرتوان با قطبش کنترل شده مورد نیاز است. انحراف پروفایل پرتو لیزری از حالت استاندارد، موضوعی است که باید در نظر گرفته شود.

اگر افزایش دما باعث ذوب کریستال نشود، قطعا راندمان لیزر را کاهش می‌دهد. دلیل این اتفاق کاهش نیمه‌عمر ترازهای برانگیخته و افزایش جمعیت تراز زمینه است[۵].

شاید در نگاه اول به‌نظر برسد که استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده می‌تواند چاره‌ساز باشد. البته در این زمینه نیز کارهایی انجام شده است که در آن با ارائه پیکربندی‌های مناسب سعی شده است اثرات گرمایی کاهش داده‌شود[۴]. در بهترین حالت که سیستم خنک‌کننده کامل است و توانایی برداشتن مقدار زیادی گرما از سطح را دارد، می‌تواند دمای سطح کریستال را همواره ثابت و یا برابر دمای محیط نگه دارد. تحت این شرایط دمای کلی کریستال در مقایسه با حالتی که خنک‌کننده وجود ندارد، به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد، ولی هنوز شیب دمایی[13] وجود دارد که اثراتی مهم‌تر از یکنواختی دما دارد.

از دیگر راه‌های کاهش اثرات گرمایی می‌توان از بهینه‌کردن توزیع گرما در کریستال لیزری از طریق تغییر طول‌موج دمش[۶] و توزیع مناسب چگالی یون‌های فعال در کریستال نام برد [۷] که

[11] Beam quality reduction
[12] Wave-front distortion
[13] Temperature gradient