





دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه ی کارشناسی ارشد رشته ی فیزیک گرایش اتمی مولکولی

بررسی عدسی حرارتی و جبران این اثر در میله لیزر Nd:YAG

استاد راهنما:

دکتر محمود سلطان الکتابی

پژوهشگر:

محمدحسن مقتدر

دی ماه ۱۳۹۰

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات
و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه
متعلق به دانشگاه اصفهان است.



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه ی کارشناسی ارشد رشته ی فیزیک گرایش اتمی مولکولی

آقای محمدحسن مقتدر تحت عنوان

بررسی عدسی حرارتی و جبران این اثر در میله لیزر Nd:YAG

در تاریخ توسط هیات داوران زیر بررسی و با درجه به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر محمود سلطان کتابی	با مرتبه علمی	استاد	امضا
۲- استاد مشاور پایان نامه	دکتر	با مرتبه علمی	امضا
۳- استاد داور داخل گروه	دکتر حمیدرضا فلاح	با مرتبه علمی	دانشیار	امضا
۴- استاد داور خارج گروه	دکتر مسعود کاوش تهرانی	با مرتبه علمی	دانشیار	امضا

امضای مدیر گروه

چکیده

هدف از این تحقیق، بررسی اثر عدسی گرمایی در لیزرهای جامد دمیده شده با لیزر نیمرسانا در چارچوب های دمش از پهلو دمش از انتها می باشد و همچنین به دست آوردن تئوری های دقیق با در نظر گرفتن تمام اثرات گرمایی و پارامترهای میله لیزری می باشد. هدف دیگر، ارائه راه حل هایی برای کاهش و جبران عدسی گرمایی در میله لیزری Nd:YAG است. برای این منظور، ابتدا در فصل اول مقدمه ای در مورد اثرات گرمایی در میله لیزری آورده می شود که با تئوری های کلی در مورد عدسی گرمایی میله لیزری آشنا شویم و همچنین بدانیم که باید بیشتر کدام پارامتر لیزر و میله لیزری را دنبال کنیم و در واقع کدام پارامتر است که تاثیر بیشتری در این اثر گرمایی دارد. در فصل دوم، یک لیزر حالت جامد که با لیزر نیمرسانا از پهلو دمیده می شود را در نظر می گیریم. در این نوع لیزر یک الگوی گرمایی با چگالی گرمایی گاوسی در سطح مقطع میله لیزری در نظر گرفته می شود و چون در این طرح میله یا چهار آرایه لیزر نیمرسانا دمیده می شود، فرض می شود که توزیع لیزرهای نیمرسانا در اطراف میله یک روشن سازی یکنواخت فضایی را به وجود آورد فقط نور دمشی که به میله وارد شده است را در نظر می گیریم. با این وجود با استفاده از معادله گرما در حالت پایا برای میله لیزری، رابطه ای برای اختلاف دمای داخل میله بدست می آوریم و چون سهم بیشینه عدسی گرمایی را همین اختلاف دما به وجود می آورد، با داشتن اختلاف دما، اختلاف فاز ایجاد شده را محاسبه می کنیم و سپس رابطه ای را برای فاصله کانونی ایجاد شده به دست می آوریم. در ادامه این فصل تغییر عدسی گرمایی میله لیزری را برای مقادیر مختلف کمر پرتو بررسی می کنیم و به این نتیجه می رسیم که هنگامی که کمر پرتوهای دمش زیاد می شوند، توزیع انرژی گرایش به یکنواخت تر شدن دارد و فاصله کانونی گرمایی بلندتر می شود که به معنای یک عدسی گرمایی کوچکتر است. در فصل سوم، لیزرهای حالت جامد با دمش از انتها در نظر گرفته می شود. در ابتدا، بر اساس نظریه اساسی انتقال گرما به یک میله لیزری، توزیع دما در مختصات استوانه ای محاسبه می شود. البته با در نظر گرفتن توزیع غیریکنواخت پرتو دمش و وابستگی دمایی رسانندگی گرمایی این کار انجام می شود. سپس با داشتن این توزیع دما و تغییری که در ضریب شکست به وجود می آید، اختلاف راه نوری در میله لیزری محاسبه می شود و آن گاه رابطه ای برای فاصله کانونی بدست می آید. در این فصل تاثیر کمر پرتو دمشی و همچنین تاثیر اندازه توان دمشی را روی عدسی گرمایی میله و ابیراهی کروی آن بررسی می کنیم و در نتیجه دیدیم که شعاع کوچکتر کمر پرتو باعث کوتاه تر شدن فاصله کانونی می شود و کوتاه تر شدن فاصله کانونی به معنای عدسی گرمایی شدیدتر است. در نتیجه می توان گفت که هر چه کمر پرتو کوچک تر باشد، عدسی گرمایی شدید تری داریم. همچنین دیدیم که زیاد شدن توان دمشی (دمش قوی تر) باعث کوتاه تر شدن فاصله کانونی و در نتیجه باعث شدیدتر شدن عدسی گرمایی می شود. در پایان اثر توزیع فضایی پرتو دمشی روی ابیراهی کروی عدسی گرمایی به طور جزئی تحلیل می شود. نتایج نشان داد که توزیع دما در میله لیزری متفاوت از تابع سهموی آرمانی است و فاصله کانونی عدسی گرمایی به صورت تابعی از مختصات I است که باعث ایجاد ابیراهی کروی می شود. در مورد اثر توزیع فضایی به این نتیجه رسیدیم که اگر توزیع پرتو دمشی به صورت نمایه سوپر گاوسی باشد و به سمت نمایه بالا-تخت برود، عدسی گرمایی میله نیز آرمانی می شود و فاصله کانونی آن ثابت می شود. در فصل چهارم، راهی برای کاهش و جبران عدسی گرمایی آورده شده است که یک طرح جبران خود تنظیم است. به

طوری که با کم و زیاد شدن توان دمشی، می تواند جبران عدسی گرمایی را تا حد بسیار خوبی انجام دهد در این روش از یک نوع ماده نوری به عنوان عنصر جبران کننده استفاده می شود.

کلمات کلیدی: عدسی گرمایی، فاصله کانونی، دمش دیودی، کمر پرتو، توان دمشی، ابیراهی کروی

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول: مقدمه ای بر آشفته‌گی های گرمایی در میله لیزری

- ۱-۱- توزیع دما در میله ۱
- ۲-۱- تنش گرمایی ۳
- ۳-۱- اثرات فوتوالاستیک ۵
- ۴-۱- عدسی گرمایی ۷

فصل دوم: محاسبه عدسی گرمایی لیزرهای حالت جامد دمیده شده از پهلوی و اثر کمر پرتو روی آن

- ۱-۲- مقدمه ۱۲
- ۲-۲- توزیع انرژی دمشی ۱۳
- ۳-۲- عدسی گرمایی ۱۷
- ۴-۲- نتیجه ۲۴

فصل سوم: عدسی گرمایی در یک لیزر Nd:YAG دمش از انتها توسط لیزر نیمرسانا و اثر توزیع

پرتو دمشی بر ابیراهی کروی عدسی گرمایی

- ۱-۳- مقدمه ۲۵
- ۲-۳- تحلیل نظری ابیراهی کروی عدسی گرمایی در یک میله لیزری ۲۶
- ۱-۲-۳- برپایی چینش آزمایشگاهی ۲۶
- ۲-۲-۳- عدسی گرمایی در شرایط آرمانی ۲۷
- ۳-۲-۳- عدسی گرمایی در شرایط واقعی ۲۷
- ۳-۳- ابیراهی کروی عدسی گرمایی ۳۲
- ۴-۳- اثر توزیع فضایی پرتو دمشی بر ابیراهی کروی ۳۳
- ۵-۳- نتیجه گیری ۴۵

فصل چهارم: جبران خود تنظیم عدسی گرمایی برای متعادل شدن عدسی گرمایی القایی در لیزرهای حالت جامد

۴-۱-مقدمه	۴۶
۴-۲-گرم شدن میله لیزری و عنصر جبران کننده	۴۸
۴-۳- عدسی های گرمایی ایجاد شده	۵۱
۴-۴- آیا طرح جبران داخل مشدد لیزری، واقع بینانه است؟	۵۱
۴-۵- تحلیل و تجزیه جزئی بیشتر	۵۲
۴-۶- پردازش دقیق رفتار مشدد	۵۵
۴-۷- پارامترهای برای یک مشدد تخت-تخت که شامل سیستم عدسی است	۵۸
۴-۸- مشدد تصویرگر	۵۹
۴-۹-نتایج	۶۰
مراجع	۶۲

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- ۱-۱- توزیع شعاعی دما در یک میله لیزری Nd:YAG به صورت تابعی از شعاع ۳
- ۱-۲- مولفه های زاویه ای و مماسی و محوری تنش در یک میله لیزری Nd:YAG به صورت تابعی از شعاع..... ۴
- ۱-۳- جهت یابی بلوری برای یک میله Nd:YAG و جهت یابی indicatrix مربوط به تنش گرمایی Nd:YAG ۶
- ۱-۴- فاصله کانونی القایی به صورت تابعی از توان ورودی لامپ برای میله های Nd:YAG ۱۱
- ۱-۲- طرح یک لیزر حالت جامد دمش از پهلوی با چهار لیزر نیمرسانا و چگونگی جفت شدگی نوری لیزر نیمرسانا با میله لیزری ۱۳
- ۲-۲- هندسه دمش از پهلوی، هنگامی که تنها یک پرتو دمش در نظر گرفته شود ۱۴
- ۲-۳- توزیع انرژی دمشی برای میله لیزری دمش از پهلوی با $\omega_p = 0.3mm$ ۱۶
- ۲-۴- توزیع انرژی دمشی برای میله لیزری دمش از پهلوی با $\omega_p = 1mm$ ۱۶
- ۲-۵- فاصله کانونی موثر به صورت یک تابع از توان دمشی برای کمرهای پرتو دمشی متفاوت ۲۳
- ۳-۱- طراحی برای ساختار یک لیزر از انتها دمیده شده و سیستم پخش گرمایی میله لیزری ۲۶
- ۳-۲- فاصله کانونی عدسی گرمایی ۳۱
- ۳-۳- وابستگی دمایی ضریب رسانندگی گرما ۳۳
- ۳-۴- اثر توزیع فضایی پرتو دمشی روی ابیراهی کروی عدسی گرمایی، برای کمرهای پرتو دمشی متفاوت ۳۶
- ۳-۵- اثر توزیع فضایی پرتو دمشی روی ابیراهی کروی عدسی گرمایی، برای توان های دمشی متفاوت ۳۸
- ۳-۶- توزیع شدت بهنجار شده برای الگوی سوپرگوسی ۳۹
- ۳-۷- اثر فاکتور N بر فاصله کانونی ۴۴
- ۴-۱- طرح جبران داخل مشدد با دو عدسی گرمایی یعنی عدسی گرمایی میله لیزری و عدسی گرمایی جبران کننده ۴۷
- ۴-۲- جمع توان های دیوپتری دو عدسی گرمایی برای مقادیر مختلف ۵۳

- ۳-۴- محدوده پایداری برای مشدد بدون عنصر جبران کننده و برای مشدد به همراه عنصر جبران کننده..... ۵۴
- ۴-۴- افزایش پهنای اولین ناحیه پایداری بر حسب برای مقادیر مختلف ۵۷
- ۵-۴- مشدد تخت-تخت که شامل یک سیستم عدسی است ۵۸
- ۶-۴- ترتیب قرار گرفتن مشدد imaging ۵۹
- ۷-۴- محاسبه اندازه مد در میله لیزری ۶۰

فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

- ۳-۱- مقادیر عددی محاسبه شده فاصله کانونی عدسی گرمایی میله لیزری برای $N=8$ ۴۳
- ۳-۲- مقادیر عددی محاسبه شده فاصله کانونی عدسی گرمایی میله لیزری برای $N=12$ ۴۴

فصل اول:

مقدمه ای بر آشفته‌گی های گرمایی در میله لیزر

۱-۱- توزیع دما در میله

با فرض یکنواخت بودن تولید گرمای داخلی و جریان خنک کننده، شارش گرما، شعاعی می‌باشد و اثرات انتهایی^۱ و تغییرات کوچک دمای خنک کننده در راستای محور را می‌توان نادیده گرفت. توزیع شعاعی دما در میله استوانه‌ای با رسانندگی گرمایی K ، در جایی که گرما با یک آهننگ Q بر واحد حجم به طور یکنواخت تولید شده است، از معادله یک بعدی رسانش گرما به دست می‌آید [۱]:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + Q = 0$$

۱-۱

جواب این معادله دیفرانسیل، دمای حالت پایا را در هر نقطه‌ای که دارای شعاع r باشد، به ما می‌دهد. با شرایط مرزی $T(r_0)$ که دما در سطح میله‌لیزری است و r_0 که شعاع آن است، داریم [۱]:

$$T(r) = T(r_0) + \frac{Q}{4} (r_0^2 - r^2)$$

۲-۱

^۱End effect

تغییرات دما بر حسب شعاع، به صورت سهمی است که دارای بیشینه ای در مرکز میله است. گرمای تولید شده در واحد حجم به صورت زیر داده می شود [۱]:

$$= \text{---}$$

۳-۱

گرمای کلی تلف شده توسط میله است و L نیز طول میله می باشد. تفاوت دما بین مرکز و سطح میله چنین خواهد بود:

$$(0) - () = \frac{\text{---}}{4}$$

۴-۱

انتقال گرما بین میله و شارش مایع، یک اختلاف دما بین سطح میله و خنک کننده به وجود می آورد. حالت پایا هنگامی به وجود خواهد آمد که P_a برابر با گرمای انتقال داده شده از سطح به وسیله ی خنک کننده باشد.

$$= 2 \quad h [() -]$$

۵-۱

h ضریب انتقال گرمای سطح و T_F دمای خنک کننده است. حال اگر مساحت سطح میله را به صورت $F = 2\pi r_0 L$ بگیریم، داریم:

$$() - = \frac{\text{---}}{h}$$

۶-۱

با روابط ۱-۴ و ۶-۱، عبارتی برای دما در مرکز پیدا می شود:

$$(0) = \text{---} + \frac{1}{4} + \frac{1}{h}$$

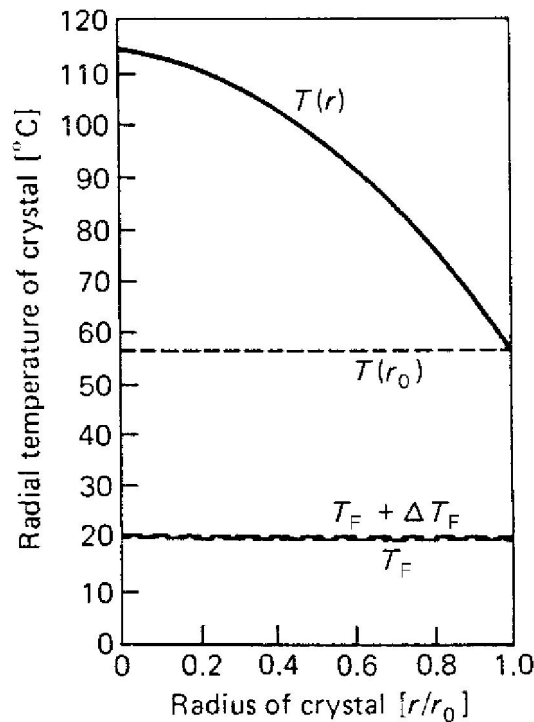
۷-۱

بنابراین با هندسه و همچنین سامانه مناسب و پارامترهای ماده، شکل و الگوی گرمایی بلور را می‌توان تعیین کرد. البته h باید محاسبه شود. این ضریب از یک عبارت نسبتاً پیچیده که شامل ویژگی‌های گرمایی خنک‌کننده، سرعت جرمی شارش و عددهای پرانت و رینولد است، به دست می‌آید.

شرایط مرزی برای ضریب انتقال گرما یعنی h عبارتند از: یک میله لیزری عایق شده ($h = 0$) و یا شارش گرمای نامحدود از سطح میله به گرماگیر^۳ ($h = \infty$)

شکل ۱-۱، مثالی از شکل دمای شعاعی در یک میله Nd:YAG که از رابطه ۷-۱ محاسبه شده را نشان

می‌دهد.



شکل ۱-۱: توزیع شعاعی دما در یک میله لیزری Nd:YAG به صورت تابعی از شعاع [۱]

^۲Prant, Reynold

^۳ Heat sink

۲-۱- تنش گرمایی^۴

گرادیانهای دمایی، تنش‌های مکانیکی در میله لیزری ایجاد می‌کند. تنشها در میله‌ی استوانه‌ای که دارای توزیع دمایی $T(r)$ می‌باشد، می‌تواند از روابط داده شده در زیر، محاسبه شوند [۱].

تنش‌های شعاعی و زاویه‌ای و محوری در یک میله همگن که دارای توزیع دمایی طبق رابطه‌ی ۲-۱ باشد به صورت زیر خواهند بود.

$$\sigma_r = \left(\frac{3}{8} - \frac{1}{4} \right) \Delta T \quad ۸-۱$$

$$\sigma_\theta = \left(\frac{3}{8} - \frac{1}{4} \right) \Delta T \quad ۹-۱$$

$$\sigma_z = 2 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{8} \right) \Delta T \quad ۱۰-۱$$

و به ترتیب گرما و ترکیبی مشخص از مدول یانگ و ثابت پواسون هستند. مؤلفه‌های تنش هنگامی که منفی هستند، منقبض شدن^۵ ماده را بیان می‌کند و هنگامی که مثبت هستند، بیان کننده‌ی کشش^۶ ماده هستند. توزیعات تنش وابستگی سهمی‌وار روی r دارد.

مؤلفه شعاعی تنش در سطح میله به سمت صفر می‌رود، در حالی که مؤلفه‌های زاویه‌ای و محوری روی سطح میله در حالت کشش هستند. شکل ۲-۱ تنش‌ها را به صورت تابعی از شعاع داخلی میله Nd:YAG نشان می‌دهد. از این منحنی پیداست که بیشترین تنش در مرکز و روی سطح میله است.

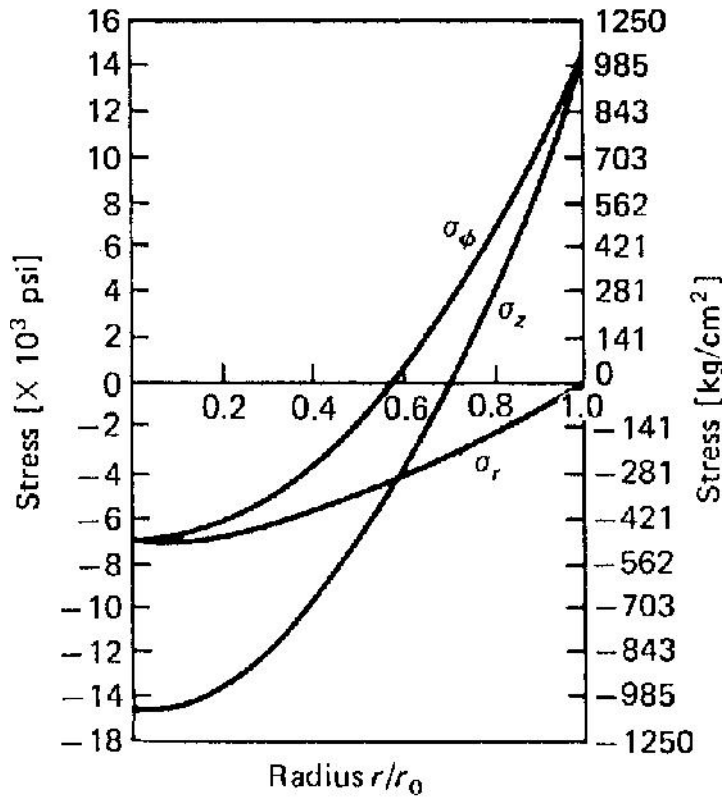
$$\sigma_r = \frac{3}{8} \Delta T \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)$$

۱۱-۱

⁴ Thermal stress

⁵ Compression

⁶ tension



شکل ۱-۲: مولفه های زاویه ای و مماسی و محوری تنش در یک میله لیزری Nd:YAG به صورت تابعی از شعاع

تنش سطحی کل یعنی σ_{max} از جمع برداری σ_ϕ و σ_z به دست می آید. $[\sigma_{max} = \frac{1}{2}\sigma_\phi]$

که در رابطه بالا ، ضریب انبساط و مدول یانگ و ثابت پواسون هستند. از رابطه ۱-۱۱ به وضوح پیداست که کشش روی سطح میله ی لیزری به ثابت فیزیکی لیزر و توان پخش شده بر واحد طول ماده بستگی دارد و هیچ وابستگی به سطح مقطع میله ندارد.

ویژگی های مکانیکی ماده ی میزبان لیزر، بیشینه تنش سطحی که می تواند قبل از شکست تحمل کند را تعیین می کند. اگر قیدهای دیگر همچون تنش های القایی و دو شکستی^۷ وجود نداشته باشند، بارگیری گرمایی و همچنین میانگین توان خروجی از یک میله لیزری تا زمانی که شکست رخ دهد، می توانند افزایش یابند. اگر σ_{max} مقدار بیشینه تنش هنگام شکست باشد. از رابطه ۱-۱۱، خواهیم داشت.

$$8 = \frac{(1 -)}{\text{نتیجه}}$$

⁷birefringence

۱۲-۱

به R پارامتر شوک گرمایی گفته می شود.

۱-۳- اثرات فوتوالاستیک

تنش‌های محاسبه شده بخش قبل در میله لیزری، کرنش‌های گرمایی تولید می کنند که به نوبت، تغییرات ضریب شکست از طریق اثرات فوتوالاستیک را موجب می شود. ضریب شکست یک ماده با شکل هندسی خاصی (indicatrix) مشخص می شود که در اغلب موارد یک بیضی است.

تغییر ضریب شکست ناشی از کرنش با یک تغییر کوچک در شکل، اندازه و جهت indicatrix همراه می - باشد. تغییر به وسیله تغییرات کوچک در ضرایب B_{ij} مشخص می شود [۱]:

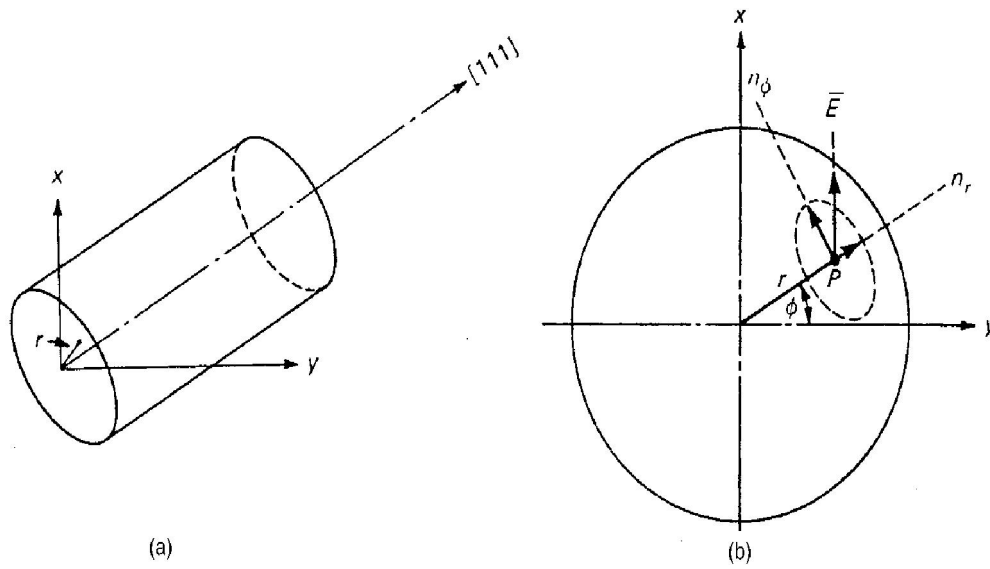
$$= \varepsilon (, , , = 1,2,3)$$

۱۳-۱

که P_{ijkl} یک تانسور مرتبه‌ی چهار برای اثرات فوتوالاستیک می باشد. عناصر این تانسور، ضرایب فوتوالاستیک هستند و ε_{kl} تانسور مرتبه‌ی دو برای کرنش است.

از آنجا که Nd:YAG یک کریستال مکعبی است بنابراین indicatrix یک کره می باشد که تحت تنش به یک بیضی تبدیل می شود. میله‌های Nd:YAG در راستای [۱۱۱] با یک محور استوانه‌ای رشد داده می شوند. نور در این راستا منتشر می شود و بنابراین تغییرات ضریب شکست در امتداد [۱۱۱] مهم است.

از آنجا که تنشهای عرضی در دو راستای شعاعی و زاویه‌ای وجود دارند (شکل ۱-۳)، در نتیجه محورهای موضعی indicatrix در این راستا خواهند بود. یعنی در واقع indicatrix در این راستاها شکل می گیرند.



شکل ۳-۱: جهت یابی بلوری برای یک میله Nd:YAG (a) و جهت یابی indicatrix مربوط به تنش

گرمایی Nd:YAG (b) [۱]

در یک سیستم مختصات استوانه‌ای، تغییرات ضریب شکست ناشی از اثرات فوتوالاستیک برای قطبش‌های Γ و ϕ چنین خواهند بود.

$$\Delta = -\frac{1}{2} \Delta$$

۱۴-۱

$$\Delta = -\frac{1}{2} \Delta$$

۱۵-۱

مقداری محاسبه‌ی تانسوری برای تعیین ضریب ΔB_r و ΔB_ϕ در یک صفحه‌ی عمود بر $[111]$ برای کریستال Nd:YAG لازم است. با معرفی عبارتهایی برای ΔB_r و ΔB_ϕ در روابط ۱-۱۴ و ۱-۱۵ طبق موارد گفته شده در روابط ۱-۱۰ و ۱-۱۱ خواهیم داشت:

۸

$$\Delta = -\frac{1}{2} \text{ ---}$$

۱۶-۱

$$\Delta = -\frac{1}{2} \text{ ---}$$

۱۷-۱

که C_r و C_ϕ توابعی از ضرایب فوتوالاستیک بلور Nd:YAG می‌باشند:

$$= \frac{(17 - 7) + (31 - 17) + 8(+1)}{48(-1)}$$

۱۸-۱

$$= \frac{(10 - 6) + 2(11 - 5)}{32(-1)}$$

۱۹-۱

دوشکستی القائیده از روابط ۱۶-۱ و ۱۷-۱ به دست می‌آید.

$$\Delta - \Delta = \text{ ---}$$

۲۰-۱

که در این رابطه داریم:

$$= \frac{+1}{48(1 -)} (- + 4)$$

۲۱-۱

جایگزین کردن مقادیر ضرایب فوتوالاستیک و پارامترهای ماده‌ی Nd:YAG از جمله $\alpha = 7.5 \times 10^{-6} / ^\circ c$ و $v = 0.25$ و $k = 0.14 w/cm^2 c$ و $n_0 = 1.82$ از روابط ۱۶-۱ تا ۲۰-۱ چنین به دست

می‌آید:

$$= 0.017 ,$$

$$=$$

$$=$$

که Q ، دارای واحد وات بر سانتی متر است و T ، نیز بر حسب سانتی متر می باشد.

۴-۱- عدسی گرمایی^۸

به آشفته‌گی‌های اپتیکی برمی گردیم که یک نتیجه از گرادیان دمایی و تنش‌ها می باشند. تغییر در ضریب شکست را می توان به دو قسمت تقسیم کرد یکی تغییر دمایی و دیگری تغییر وابسته به تنش.

$$\Delta n(r) = \Delta n(r)_T + \Delta n(r)_\epsilon$$

۲۲-۱

که $n(r)$ تابع شعاعی ضریب شکست و n_0 ضریب شکست در مرکز میله و $\Delta n(r)_T$ و $\Delta n(r)_\epsilon$ به ترتیب تغییرات وابسته به دما و تنش برای ضریب شکست می باشند. تغییر وابسته به دما در ضریب شکست می تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\Delta n(r) = [n(r) - n(0)] - \dots$$

۲۳-۱

که با کمک روابط ۱-۲ و ۴-۱ می توان به دست آورد:

$$\Delta n(r) = -\frac{\dots}{4} \dots$$

۲۴-۱

از روابط ۱-۱۶ و ۱۷-۱ و ۲۴-۱، پداسست که ضریب شکست در میله لیزری یک تابعیت از مرتبه‌ی دو با شعاع میله را از خود نشان می دهد. یک پرتو نور که در امتداد محور میله انتشار می یابد تغییر فازی از مرتبه‌ی دو را متحمل می شود. این آشفته‌گی هم‌ارز با اثر یک عدسی کروی است، فاصله کانونی ماده عدسی ماندی که ضریب شکست آن دارای تغییرات شبیه رابطه

⁸Thermal lensing