



بررسی اثر عدسی گرمایی بر انتشار پرتوی گاوسی تخت شده همدوس جزئی در لیزر حالت جامد Nd:YAG

الهام آل سعدی، علیرضا کشاورز و محمدجواد کریمی

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

چکیده – در این مقاله اثر عدسی گرمایی بر یک پرتوی گاوسی تختشده همدوس جزئی هنگام عبور از یک کریستال Nd:YAG استوانه-ای شبیهسازی شدهاست. ابتدا معادله انتشار پرتوی گاوسی تختشده همدوس جزئی از یک سیستم نوری پیرامحوری را با استفاده از ماتریس ABCD مینویسیم. سپس معادله گرما برای Nd:YAG که توسط لیزر دیودی از انتها دمیده میشود را به صورت تحلیلی بدست می آوریم. با داشتن توزیع دما و معادله انتشار، به بررسی انتشار این پرتو در یک محیط عدسی گرمایی می پردازیم.

کلید واژه- پرتوی گاوسی تخت شده همدوس جزئی ، سیستم ABCD، محیط عدسی گرمایی

Investigation of influence of thermal lensing on the propagation of partially coherent flattened Gaussian beam in the Nd:YAG solid-state laser

Elham Alesadi, Alireza Keshavarz, Mohammad Javad Karimi

Department of Physics, Faculty of Sciences, Shiraz University of Technology, Shiraz

Abstract- In this work we simulate the effect of thermal lensing on propagation of partially coherent flattened Gaussian beam within Nd:YAG laser crystal. At first, an analytical solution of heat equation for an LD end-pumped Nd:YAG laser was derived. Then, an explicit and analytical formula for the propagation of partially coherent FGBs through a paraxial optical ABCD system is introduced. Finally, based on the temperature and equation of propagation, we can investigate the propagation of FGB's in a thermal lens medium.

Keywords: partially coherent flattened Gaussian beam; ABCD system; Thermal lens medium

۱– مقدمه

در بسیاری از کاربردهای لیزر پرتوان وجود منابع لیزری با توزیع شدت تخت برخلاف توزیع شدت گاوسی موردنیاز است. بنابراین در طول سالهای اخیر توجه گستردهای به پرتوهای تخت و روشهای تولید آن شده است. چندین مدل به منظور توصیف پرتوی لیزری تخت ارائه شده است. مدل سوپر گاوسی اولین مدل است. در سال ۱۹۹۴، گری(Gori) مدل دیگری به نام پرتوی گاوسی

تخت شده(FGB) معرفی کرد[۱]. از آن پس برروی انتشار این پرتوها در زمینههای نظری و تجربی کارهای بسیاری صورت گرفتهاست.

کیفیت خوب پرتوی لیزرهای پرتوان برای بسیاری از کاربردهای صنعتی لازم و ضروری است. اما اثرات گرمایی در لیزرهای حالتجامد باعث ایجاد عدسی گرمایی شده که در نتیجه آن میدان الکتریکی هنگام عبور از محیط، دچار اعوجاج می شود. این اعوجاج باعث کاهش کیفیت پرتو میگردد. بررسی اثر عدسی گرمایی بر پرتوهای اینس-گاوسی و بسل-گاوسی انجام گرفتهاست[۲و۳]. اما تاکنون این اثر بر پرتوی FGB بررسی نشده است. در مرجع [۴و۵] اثر عدسی گرمایی بر این گونه پرتوها را تنها با استفاده از ماتریس عدسی گرمایی شبیهسازی کردهایم. درحال حاضر در این کار با حل معادله گرما و داشتن توزيع دما به بررسی اين اثر بر پرتوی FGB می پردازيم. به همین منظور ابتدا معادله انتشار حاکم بر پرتوی FGB همدوس جزئي را به وسيله ماتريس ABCD مينويسيم. سپس معادله گرما را به صورت تحلیلی حل میکنیم. با داشتن توزیع دما ماتریس ABCD یک محیط عدسی گرمایی را بدست می آوریم. و در آخر انتشار پرتوی FGB همدوس جزئی را در محیط عدسی گرمایی شبیهسازی میکنیم. نتایج حاصله میتوانند در طراحی لیزرهای ۲- مبانی نظری

$$W(x_1, x_2; 0) = \sum_{n=0}^{N} \sum_{m=0}^{N} \frac{1}{n!m!} \left(\frac{x_1^2}{w_{0N}^2}\right)^n \left(\frac{x_2^2}{w_{0N}^2}\right)$$
(1)

$$\times \exp\left[-\frac{x_1^2 + x_2^2}{w_{0N}^2} - \frac{(x_1 - x_2)^2}{2\sigma_g^2}\right]$$

مرتبه $N \cdot w_{0N}^2 = w_0^2 / N + 1$ مرتبه میاای همدوسی عرضی، $\sigma_{\rm g}$

با استفاده از انتگرال پراش تعمیمیافته هویگنس-فرنل انتشار چگالی سطح مقطع طیفی پرتوی همدوس جزئی در یک سیستم نوری با ماتریس ABCD به صورت زیر بدست میآید[۶]:

$$W_{0}(u_{1}, u_{2}; z) = \frac{\pi}{\lambda B} \sum_{n=0}^{N} \sum_{m=0}^{N} \sum_{p=0}^{2m} \sum_{p=0}^{h/2} {2m \choose h}$$

$$\times \frac{(-1)^{p}}{p!(h-2p)!} \frac{h!}{n!m!} \frac{2^{p-2n-3m-h/2}}{w_{0N}^{2m}w_{0N}^{2n}C_{1}^{m-p+h/2+1/2}}$$

$$\times \frac{(i)^{-2n-2p}}{C_{2}^{n-p+h/2+1/2}} \left(\frac{1}{\sigma_{g}^{2}}\right)^{h-2p} \exp\left[-\frac{ikD}{2B}u_{1}^{2} + \frac{ikD}{2B}u_{2}^{2} - \frac{k^{2}u_{2}^{2}}{4C_{1}B^{2}}\right] \times \exp\left[-\frac{k^{2}}{4C_{2}B^{2}} \right]$$

$$\times \left(u_{1} - \frac{u_{2}}{2C_{1}\sigma_{g}^{2}}\right)^{2} H_{2m-h}\left(\frac{ku_{2}}{B\sqrt{2C_{1}}}\right) H_{2n+h-2p}$$

$$\times \left[\frac{k}{\sqrt{2C_{1}B}}\left(\frac{u_{2}}{2C_{1}\sigma_{g}^{2}} - u_{1}\right)\right]$$
(Y)

معادله (۲) فرمول تحلیلی چگالی سطح مقطع طیفی پرتوی FGB همدوس جزئی عبوری از یک سیستم نوری ABCD است. که C₁ و C₂ عبارتند از:

$$C_{1} = \left(\frac{1}{w_{0N}^{2}} + \frac{1}{2\sigma_{g}^{2}} - \frac{ikA}{2B}\right)$$
(7)

$$C_2 = \left(\frac{1}{w_{0N}^2} + \frac{1}{2\sigma_g^2} + \frac{ikA}{2B} - \frac{1}{4C_1\sigma_g^4}\right)$$

شدت تابش پرتوی همدوس جزئی با رابطه I(x;z)=W(x,x;z) مشخص می شود. در بخش بعد ماتریس ABCD یک عدسی گرمایی را محاسبه می کنیم.

97

۳- ملاحظات گرمایی

فرض می کنیم که FGB به وسیله یک کریستال حالت-جامد که از انتها تحت دمش گاوسی است تولید می شود. برای بررسی اثر عدسی گرمایی بر FGB باید ماتریس ABCD محیط عدسی گرمایی را محاسبه کنیم.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial T}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{S(\rho, z)}{K}$$
(Δ)

K رسانندگی گرمایی و ثابت است و $S(\rho,z)$ چگالی منبع گرمایی با بعد $Watt/m^3$ میباشد. چشمه را به صورت S $_0$ می گیریم. $S(\rho,z)=S_0\exp(-2\rho^2/w_p^2)\exp(-\alpha z)$ شابت، α ضریب جذب کریستال در طول موج دمش و w_p اندازه لکه پرتوی دمش است. شرایط مرزی عبارتند از:

$$-K \frac{\partial \rho}{\partial T} \bigg|_{\rho = \rho_0} = h[T(\rho_0, z) - T_0]$$

$$K \frac{\partial T}{\partial z} \bigg|_{z=0} = h[T(\rho, 0) - T_0]$$

$$-K \frac{\partial T}{\partial z} \bigg|_{z=L} = h[T(\rho, L) - T_0]$$
(8)

 ρ_0 دمای مایع خنک کننده، h ضریب انتقال گرمایی و Γ_0 شعاع کریستال است. حل دقیق معادله (۵) با استفاده از شرایط مرزی (۶) توسط گروه یوسیویچ(Usievich) انجام گرفته است[۷]:

$$T(\rho, z) - T_0 = \sum_{i=0}^{\infty} t_i(z) J_0(v_i \rho)$$
(Y)

و $hJ_0(\upsilon \rho_0)$ -K $\upsilon J_1(\upsilon \rho_0)=0$ و υ_i ریشههای مثبت تابع v_i $t_i(z)=t_i^+exp(\upsilon_i z)+t_i^-exp(-\upsilon_i z)+q_iexp(-\alpha z)$

$$q_{i} = \frac{\int_{0}^{\rho_{0}} 2S_{0} \exp\left(-\frac{2\rho^{2}}{w_{p}^{2}}\right) J_{0}(v_{i}\rho)\rho d\rho}{\rho_{0}^{2}K(v_{i}^{2}-\alpha^{2})[J_{0}^{2}(v_{i}\rho)+J_{1}^{2}(v_{i}\rho)]}$$
(A)

 t_i^+ و t_i^- فرایبی هستند که در شرایط مرزی (۶) صدق t_i^+ میکنند. با پیدا کردن دما میتوانیم تغییرات ضریب

$$\Delta n(\rho, z) = \frac{\partial n}{\partial T} (T(\rho, z) - T(\rho_0, z))$$
(9)

با بسط تابع بسل در معادله (۷) و قرار دادن آن در (۹) ضریب شکست به صورت زیر خواهد شد:

$$n(\rho, z) \approx n_0 (1 - \rho^2 \frac{1}{4n_0} \frac{\partial n}{\partial T} \sum_{i=0}^{\infty} t_i(z) v_i^2) \qquad (1 \cdot)$$

ضریب شکست یک محیط شبه-عدسی عبارت است از .n(ho,z)=n₀(1- $ho^2\gamma^2/2$)

$$\gamma(z) = \sqrt{\frac{1}{2n_0} \frac{\partial n}{\partial T} \sum_{i=0}^{\infty} t_i(z) v_i^2}$$
(11)

به طور کلی ماتریس عدسی گرمایی عبارت است از:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\gamma L) & \sin(\gamma L)/(m_0) \\ -m_0 \sin(\gamma L) & \cos(\gamma L) \end{pmatrix}$$
(17)

L طول میله است. با استفاده از روش ارائه شده در [۳] میله کریستالی را به M تیغه نازک با ضخامت δ =L/M تقسیم می کنیم طوری که γ در هر تیغه یک مقدار ثابت اما متفاوت با تیغه مجاور باشد. با استفاده از (۱۱) و (۱۲) المانهای ماتریسی مربوط به هر تیغه را حساب و در ماتریسهای تیغه بعدی ضرب می کنیم تا ماتریس ABCD کلی محیط بدست آید.

۴- شبیهسازی

در اینجا شعاع $p_0=1.5$ س $p_0=100$ و طول موج $p_0=1.5$ درنظرگرفته شده است. شکل ۱ توزیع شدت $\lambda=1064$ µm ممدوس جزئی در z=0 است. شکل ۲ توزیع شدت GB همدوس جزئی در z=0 است. شکل ۲ توزیع شدت یک FGB با γ ثابت (مستقل از z) در z=5mm را نشان میدهد. در شکل ۳، γ وابسته به z و طول میله mScr iddر گرفته شده است. شکل ۴ توزیع شدت یک FGB همدوس جزئی با γ ثابت در z=500mm را نشان میدهد. شکل ۵ توزیع شدت را زمانی که γ وابسته به z و طول



شکل ۱: توزیع شدت یک FGB همدوس جزئی با σ=2mm ،N=5 و w₀=1mm در z=0.



شکل ۲: توزیع شدت یک FGB همدوس جزئی با σ=2mm ،N=5 و wo=1mm در z=L=5mm با γ ثابت.



شکل ۳: توزیع شدت یک FGB همدوس جزئی با σ=2mm ،N=5 و wo=1mm در z=5 با γ وابسته به z. و L=5mm.

میله 500mm درنظر گرفته شده است بیان می کند.

۵- نتیجهگیری

با مقایسه شکل ۲ و ۳ متوجه می شویم که در نظر گرفتن تغییرات ضریب شکست در جهت z تأثیر بسزایی در تغییر کیفیت پرتو ندارد. اما مقایسه شکل ۴ و ۵ نشان می دهد که با افزایش طول میله باید تغییرات ضریب شکست در جهت z درنظر گرفته شود، البته آن هم برای L های بزرگ. با مقایسه شکل ۱ و ۲ یا ۱ و ۳ می بینیم که پرتوی FGB همدوس جزئی در حین انتشار در میله دچار



شکل ۴: توزیع شدت یک GBB همدوس جزئی با σ=2mm ،N=5 و wo=1mm در z=L=500mm در wo=1mm



شکل ۵: توزیع شدت یک FGB همدوس جزئی با σ=2mm ،N=5 و wo=1mm با γ وابسته به z و L=500mm.

بهمریختگی نمیشود. و اثرات گرمایی بر آن تأثیر چندانی ندارد. از این خاصیت میتوان در طراحی لیزرهای حالت-جامد استفاده کرد.

مراجع

- Gori F., Flattened Gaussian beam, Opt. Commun. 107 (1994) 335.
- [2] Xu T., Wang S., Propagation of Ince-Gaussian beams in a thermal lense medium, Opt. Commun. 265(2006) 1-5.
- [3] M. Sabaeian, H. Nadgaran, Bessel–Gauss beams: Investigations of thermal effects, Opt. Commun. 281 (2008) 672–678.
- [۴] کشاورز، علیرضا، کریمی، محمدجواد، آلسعدی، الهام، انتشار پرتوی گاوسی تختشده در محیط عدسی گرمایی، نوزدهمین کنفرانس ایتیک و فوتونیک ایران و پنجمین
- کنفرانس مهندسی فوتونیک ایران ، ۱۳۹۱. [۵] آلسعدی، الهام، کشاورز، علیرضا، کریمی، محمدجواد، انتشار پرتوی گاوسی تختشده همدوس جزئی در محیط عدسی گرمایی، سومین همایش ملی مهندسی اپتیک و لیزر ایران ، ۱۳۹۲.
- [6] Cai Y. and He S., Partially coherent flattened Gaussian beam and its paraxial propagation properties, J. Opt. Soc. Am. (2006) A, 23.
- [7] B.A. Usievich, V.A. Sychugov, F. Pigeon, A. Tishchenko, Analytical Treatment of the Thermal Problem in Axially Pumped Solid-State Lasers, IEEE J. Quantum Electron. 37 (2001) 1210.