

بررسی مشخصه‌های ترکیب همدوس ۱۹ باریکه‌ی لیزر فیبری برای دست‌یابی به توان‌های چند ده کیلووات در فاصله‌ی ۱۰ کیلومتری

سید حامد قاسمی*^۱، احد حق پرست^۲

۱. دانشکده‌ی فنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، صندوق پستی: ۴۴۳۵-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

۲. باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد مرند، دانشگاه آزاد اسلامی، صندوق پستی: ۵۴۱۶۵-۱۶۱، مرند - ایران

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۷/۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۱۲/۹

چکیده: در این مقاله، از ترکیب همدوس لیزری برای طراحی پرتو توان بالای ۵۰ kW، در راستای به کارگیری مستقیم انرژی استفاده شده است. از آنجایی که آشفتگی محیطی قوی باعث کاهش مزیت‌های ترکیب همدوس پرتوها می‌شود، سطح آشفتگی پایین در نظر گرفته شده است. عناصر ترکیب از ۱۹ لیزر فیبری قطبیده با توان ۳ kW در ساختاری به شکل دو حلقه‌ی شش‌ضلعی منظم در نظر گرفته شده است. هر لیزر فیبری دارای یک باریکه‌ساز با اندازه‌ی لکه‌ی خروجی ۳۰ mm است. محدوده‌ی انتقال به $z = 10$ km و ضریب پُرشدگی تا $f = 0.91$ افزایش داده شده است. در نتیجه، تلفات توان در لبه‌های جانبی کمینه بوده و باعث افزایش بازده ترکیب تا ۸۸٪ می‌شود. این بازده بالاترین نتیجه است که تاکنون منتشر شده است. شعاع اندازه‌ی لکه‌ی مرکزی در هدف، $R = 5.9$ cm است که نشان می‌دهد چگالی توان در حدود 0.45 kW cm⁻² است. همچنین اثر خطاهای فازی در عناصر ترکیب همدوس در میدان دور که باعث پراکندگی شدت پرتو از مرکز به کناره‌ها می‌شود، نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

کلیدواژه‌ها: لیزر فیبری، ترکیب همدوس

Investigation of the coherent combination of a 19-fiber laser beam characteristics to achieve a multi tens of kW at a distance of 10 km

S.H. Ghasemi*¹, A. Haghparast²

1. Islamic Azad University, Tehran South Branch, P.O.Box: 11365-4435, Tehran – Iran

2. Young Researchers and Elite Club, Marand Branch, Islamic Azad University, P.O.Box: 54165-161, Marand – Iran

Abstract: In this paper, we used a coherent beam combination to design a 50 kW high power laser beam for energy applications. Because of the strong environmental turbulence, degrade the coherent beam combination advantages, low turbulence level is considered. Combining elements are composed of 19 polarized single mode 3 kW high power fiber lasers where are arranged in the co- two centric hexagonal rings. Each of the fiber a lasers has a collimator with a 30 mm beam spot size output. We extended the transmitting range to $z=10$ km and the improved filling factor up to $f=0.91$. Therefore, power loss at the side lobes are minimized and resulted in the rise of combination efficiency to 88%, which is the highest published result. The central spot size radius on the target is $R=5.9$ cm, where indicate 0.45 kW/cm² power density. Also, the effect of Phase errors of the combining elements at the far- field, which cause the ray intensity scattering from the center spot to the side lobes is investigated.

Keywords: Fiber laser, Coherent combining

۱. مقدمه

لیزر چندین کیلومتر را در جو آشفته می‌پیماید، در نتیجه جو تأثیر منفی بر کیفیت پرتو لیزر می‌گذارد. از این رو مطالعه‌ی پرتو لیزر در شرایط مختلف آب و هوایی امری ضروری می‌نماید. پارامترهایی همانند پراکندگی، آشفته‌گی اتمسفری و شکوفه‌شدگی گرمایی^۱ در [۷، ۱۰-۱۴] مورد بررسی قرار گرفته است.

این مقاله ابتدا ویژگی‌های انتشار پرتو در فضای آزاد شامل اثرات آشفته‌گی جو بر روی انتقال پرتو را مورد مطالعه قرار می‌دهد. در ادامه، نظریه‌ی ترکیب همدوس در توزیع شدت میدان دور در بخش ۲ توصیف می‌شود. در نهایت نتایج ترکیب همدوس ۱۹ باریکه‌ی لیزر برای دستیابی به باریکه‌ای با توان ۵۰ kW در فاصله‌ی ۱۰ km بیان شده، تأثیر خطای فازی بر توزیع شدت نهایی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. انتشار پرتو در فضای آزاد

انتشار باریکه‌ی لیزر در هوا تحت تأثیر اتم‌ها، مولکول‌ها و ذرات معلق^۲ است که باعث پراکندگی و جذب انرژی لیزر می‌شود. ذرات معلق شامل گرد و غبار و سایر آلاینده‌های هوا است. برای در نظر گرفتن و محاسبه‌ی اثر جذب و پراکندگی در هوا ضریب ۳ را معرفی می‌کنیم که حاصل ترکیب ضریب جذب، α ، و ضریب پراکندگی، β ، بوده و تغییرات شدت باریکه‌ی لیزر را بر حسب مسافت طی شده، z ، بیان می‌کند.

$$\gamma = \alpha + \beta \quad (1)$$

این تغییرات با رابطه‌ی بیر- لامبرت^۳ بیان می‌شود و نشان‌دهنده‌ی کاهش نمایی شدت لیزر در انتشار از داخل اتمسفر است [۷، ۱۲، ۱۵].

$$I(z) = I_0 \exp(-\gamma z) \quad (2)$$

پیر واضح است که ضریب جذب و پراکندگی و در نتیجه γ به طول موج لیزر وابسته است. بنابراین اتمسفر تأثیر متفاوتی بر

کاربردهای نوین صنعتی و نظامی از قبیل کاربردهای انرژی هدایت شده نیاز به لیزرهای پرقدرت با گستره‌ی توانی از مرتبه‌ی ۱۰۰ kW دارند که دو پارامتر بازده بالا و کیفیت خوب پرتو را به صورت هم‌زمان داشته باشند و این توان باید در فاصله‌ی چندین کیلومتری با کم‌ترین اتلاف و پراکندگی منتشر شود.

با افزایش توان لیزر به کیلووات کیفیت باریکه کاهش محسوسی دارد که برای انتقال در مسافت‌های طولانی مناسب نیستند. از سوی دیگر افزایش بیش‌تر توان لیزر با عوامل محدودکننده‌ی اثرات گرمایی و غیرخطی از قبیل پراکندگی بریلوئن برانگیخته مواجه می‌شود که با افزایش طول فیبر، اثرات مخرب آن‌ها نیز شدیدتر می‌شود. برخی از این آشفته‌گی‌ها و اثرات غیرخطی را می‌توان با انتخاب مناسب هندسه‌ی ماده‌ی فعال لیزر، نوع دمش و خنک‌سازی مناسب آن کاهش داد [۴-۱]. ولی افزایش بیش‌تر توان دوباره با عوامل محدودکننده روبه‌رو می‌شود. با وجود این، هم‌چنان تلاش‌ها برای غلبه بر این اثرات گرما- نوری و غیرخطی ادامه دارد.

محدوده‌ی توانی مورد نیاز برای استفاده در کاربردهای انرژی هدایت شده از مرتبه‌ی ۱۰۰ kW است. یک راه مناسب و جایگزین برای افزایش توان لیزر، بدون مواجهه با این عوامل منفی، ساخت واحدهای توان- پایین و ترکیب آن‌ها با یک‌دیگر برای داشتن یک تک باریکه است. برای رسیدن به سطح توان مورد نیاز برای این کاربردها، لازم است که تعداد زیادی لیزر ترکیب و باریکه‌ی حاصل در فاصله‌های چندین کیلومتری در فضای آشفته و اتمسفر منتشر شود. پروژه‌ی سلاح لیزری با استفاده از ترکیب باریکه‌های لیزر فیبری در سال ۲۰۰۵ در آزمایشگاه نیروی دریایی آمریکا به پیش برده شد. هم‌چنین گروه لیجیا کیان و زیدین لیو از دانشگاه فودان چین [۵، ۶]، گروه فیلیپ اسپانگل در آزمایشگاه تحقیقات نیروی دریایی ایالات متحده (NRL) [۴، ۷]، میشل آ. ورونسلف و همکاران در دانشگاه دایتون [۸] گروه دجانی در آزمایشگاه تحقیقاتی نیروی هوایی ایالات متحده [۹] بعضی از گروه‌های پژوهشی متنوع در مورد روش ترکیبی پرتوهای یکپارچه است.

در بیش‌تر موارد کاربردهای انرژی هدایت شده، فاصله‌ی مابین منبع لیزر و هدف زیاد است. در بعضی از کاربردها پرتو

1. Thermal blooming
2. Aerosol
3. Beer-Lambert law

متوسط زمانی شدت باریکه‌ی لیزر در مسافت L ، با فرض نمایه‌ی گاوسی به صورت زیر است [۷، ۱۴]:

$$I(r, z=L) = I_0 \frac{R_0^2}{R^2(L)} \exp\left(-\frac{r^2}{R^2(L)}\right) \quad (5)$$

که در آن $R(L)$ متوسط زمانی اندازه‌ی شعاع باریکه است که چنین نوشته می‌شود.

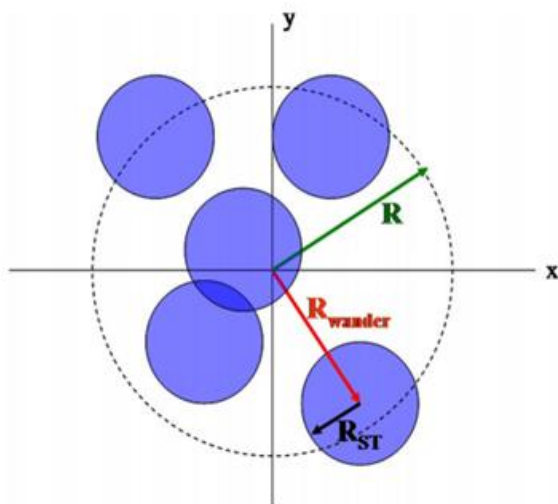
$$R^2(L) = \left(\frac{\lambda L}{\pi R_0}\right)^2 \left[(M^2)^2 + r_0^2 \left(\frac{R_0}{r_0}\right)^2 \right] + \theta_{div}^2 L^2 + R_0^2 \left(1 - \frac{L}{L_F}\right)^2 \quad (6)$$

که در آن $R = (R_w^2 + R_s^2)^{1/2}$ و R_w فاصله‌ی انحراف از مرکز باریکه و R_s شعاع باریکه‌ی لیزر است. انحراف باریکه در شکل ۱ نشان داده شده است.

$$R_w^2 = 1,7 \left(\frac{\lambda L}{\pi R_0}\right)^2 \left(\frac{R_0}{r_0}\right)^{2/3} \quad (7)$$

که در آن R_0 اندازه‌ی اولیه‌ی شعاع باریکه‌ی لیزر و L_F فاصله‌ی کانونی و r_0 طول همدوسی عرضی باریکه‌ی لیزر است [۷].

$$r_0 = 0,184 \left(\frac{\lambda^2}{C_n^2 L}\right)^{1/5} \quad (8)$$



شکل ۱. تصویر طرح‌وار اثر آشفته‌گی بر باریکه. R_w انحراف از مرکز باریکه و R_s شعاع باریکه‌ی افزایش یافته است.

طول موج‌های مختلف دارد. جذب انرژی باریکه‌ی لیزر توسط مولکول‌های هوا باعث افزایش دمای آن می‌شود. اگر مقدار جذب بالا باشد، اثر شکوفه شدگی گرمایی نیز رخ می‌دهد. از سوی دیگر ضرایب جذب و پراکندگی ذرات معلق شدیداً به شعاع باریکه‌ی لیزر بستگی دارد. برای کاهش اثرات ذرات معلق می‌توان مسیر انتشار باریکه را با تبخیر ذرات معلق پاکسازی کرد.

۳. باز و منحرف شدن باریکه به دلیل آشفته‌گی هوا

تغییرات چگالی هوا و عدم همگنی دمای محیطی در مسیر انتشار پرتو منجر به نوسان ضریب شکست و در نتیجه باعث انحراف و پهن شدگی باریکه‌ی لیزر می‌شود. ضریب شکست محیط با رابطه‌ی زیر معین می‌شود [۷، ۱۳، ۱۶]:

$$n = 1 + \delta n_{Turb}(x, y, z, t) \quad (3)$$

که در آن δn_{Turb} تغییرات ضریب شکست به دلیل آشفته‌گی و تلاطم هوا با $\langle \delta n_{Turb} \rangle = 0$ و $\langle \delta n_{Turb}^2 \rangle \neq 0$ است.

آشفته‌گی محیط انتشار باریکه‌ی لیزر باعث باز شدن باریکه و کشیده شدن آن می‌شود. آشفته‌گی محیط انتشار با عدد ریتو^۱ که برابر با لگاریتم واریانس دامنه است داده می‌شود. آشفته‌گی اتمسفر را می‌توان به سه نوع آشفته‌گی ضعیف، متوسط و شدید تقسیم کرد. می‌توان تغییرات عدد ریتو را برحسب ثابت ساختار ضریب شکست، C_n^2 ، طول موج، λ ، مسافت انتشار، L بیان کرد.

$$\sigma_R^2 \approx 1,5 C_n^2 \lambda^{7/6} L^{11/6} \quad (4)$$

عموماً C_n^2 در محدوده‌ی 10^{-15} و $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ قرار دارد. شدت آشفته‌گی برحسب این پارامتر در جدول ۱ درج شده است.

جدول ۱. محدوده‌ی مقادیر برای انواع تلاطم و آشفته‌گی اتمسفر

مقدار آشفته‌گی	$(C_n^2 \text{ m}^{-2/3})$	σ_R^2
آشفته‌گی ضعیف	۱۵-۱۰	صفر
آشفته‌گی متوسط	۱۴-۱۰	۰,۱
آشفته‌گی شدید	۱۳-۱۰	۱

1. Rytov number

با کمک اپتیک تطبیقی می‌توان اثر آشفته‌گی بر انتشار باریکه‌ی لیزر را جبران کرد ولی اثرات پراش و کیفیت پایین باریکه‌ی لیزر قابل جبران و اصلاح نیست. بنابراین می‌توان گفت اپتیک تطبیقی بازده انتشار را برای لیزر تک مد افزایش می‌دهد ولی برای لیزر چند مدی که کیفیت باریکه آن پایین است اثری ندارد.

با بهینه کردن و تصحیح جبهه‌ی موج باریکه‌ی منتشر شونده، می‌توان لیزر را به صورت مؤثرتری بر روی هدف متمرکز کرد. با استفاده از یک باریکه نشانگر^۱ می‌توان انحراف و ابیراهی فاز استفاده شده برای تصحیح دامنه و فاز باریکه‌ی لیزر پرتوان را ثبت کرد. بیشینه شدت باریکه‌ی لیزر در مرکز باریکه در اتمسفر بر روی هدف به صورت زیر بیان می‌شود:

$$I(r=0, z=L) = \left(\frac{\epsilon_0 \mu_0 P_T}{(M^2)^2 + r_0^2 \left(\frac{R_0}{r_0} \right)^2} \right) \left(\frac{R_0}{\lambda L} \right) \exp(-\gamma L) \quad (10)$$

که در آن γ ضریب اتلاف کل است که با معادله‌ی (۲) داده می‌شود و P_T توان کل باریکه‌ی منتشر شده است. شکل ۲ داده‌های شبیه‌سازی شده‌ی بیشینه‌ی شدت مرکزی را برای باریکه‌ی لیزر فیبری تک مد با توان ۳ KW، طول موج $\lambda = 1070 \text{ nm}$ و در فاصله $z = 10 \text{ km}$ برحسب شعاع اولیه‌ی باریکه لیزر در محیط‌های مختلف آشفته‌گی نشان می‌دهد.

حداکثر شدت تابش لیزر بر روی هدف در محیط با آشفته‌گی پایین، 120 W cm^{-2} است. در حالی که برای آشفته‌گی‌های متوسط و زیاد به ترتیب به 8 W cm^{-2} و 0.5 W cm^{-2} تقلیل می‌یابد. این کاهش به علت انحراف پرتو و پهن‌شدگی ناشی از آشفته‌گی جو است.

اگر آشفته‌گی بسیار زیاد باشد، $r_0 < 1.7 \frac{R_0}{M^2}$ است و

معادله‌ی (۱۰) را می‌توان به صورت زیر بازنوشت:

$$I_{max} = r_0 \mu_0 P_T \left(\frac{r_0}{\lambda L} \right)^2 \exp(-\gamma L) \quad (11)$$

با توجه به معادله‌ی (۶)، کم‌ترین مقدار شعاع باریکه‌ی روی هدف در $L = L_f$ به دست می‌آید. در این صورت و با نادیده گرفتن بازشدگی جیترو بدون این که خطای زیادی وارد سیستم شود، می‌توان معادله‌ی ۶ را چنین نوشت.

$$R(L) = \left(\frac{\lambda L}{\pi R_0} \right) \left((M^2)^2 + r_0^2 \left(\frac{R_0}{r_0} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (9)$$

در شبیه‌سازی انجام شده، تغییرات اندازه‌ی شعاع باریکه‌ی لیزر در فاصله‌ی $z = 10 \text{ Km}$ و برای طول موج $\lambda = 1070 \text{ nm}$ با ضریب کیفیت $M^2 = 1$ و اندازه‌ی شعاع‌های اولیه‌ی مختلف برای انتشار در محیط‌های با آشفته‌گی‌های متفاوت در جدول ۲ ثبت شده است. با افزایش شعاع اولیه‌ی باریکه، اندازه‌ی لکه بر روی هدف در هر نوع آشفته‌گی کاهش می‌یابد. برای محیط با آشفته‌گی پایین، روند کاهش اندازه‌ی لکه بر روی هدف برای شعاع اولیه‌ی بزرگ‌تر از 30 mm کاهش می‌یابد و مقدار تغییرات آن از شعاع اولیه‌ی 30 mm تا 100 mm برابر 25.3% است. با افزایش مقدار آشفته‌گی این اختلاف کم‌تر شده و به 2.5% برای محیط با آشفته‌گی متوسط و 0.5% برای محیط با آشفته‌گی شدید می‌رسد. بنابراین می‌توان گفت اندازه‌ی لکه باریکه‌ی لیزر تک مد ($M^2 = 1$) بر روی هدف در محیط با آشفته‌گی پایین، به شعاع اولیه‌ی باریکه‌ی لیزر بسیار حساس است در حالی که این حساسیت برای محیط‌های با آشفته‌گی متوسط به بالا کم‌تر می‌شود.

جدول ۲. تغییرات اندازه‌ی شعاع باریکه‌ی لیزر در فاصله‌ی $z = 10 \text{ km}$ و برای طول موج $\lambda = 1070 \text{ nm}$ با ضریب کیفیت $M^2 = 1$ و اندازه‌ی شعاع‌های اولیه‌ی مختلف برای انتشار در محیط‌های با آشفته‌گی‌های متفاوت

R (cm)			R ₀ (mm)
C _n ² =12-10 m ^{-2/3}	C _n ² =14-10 m ^{-2/3}	C _n ² =15-10 m ^{-2/3}	
387	344	341	1
196	82.2	69.1	5
187	57.3	36	10
184	49.1	20.6	20
184	47.4	16.2	30
184	46.8	14.4	40
184	46.6	13.4	50
183	46.4	12.9	60
183	46.3	12.6	70
183	46.3	12.3	80
183	46.2	12.2	90
183	46.2	12.1	100

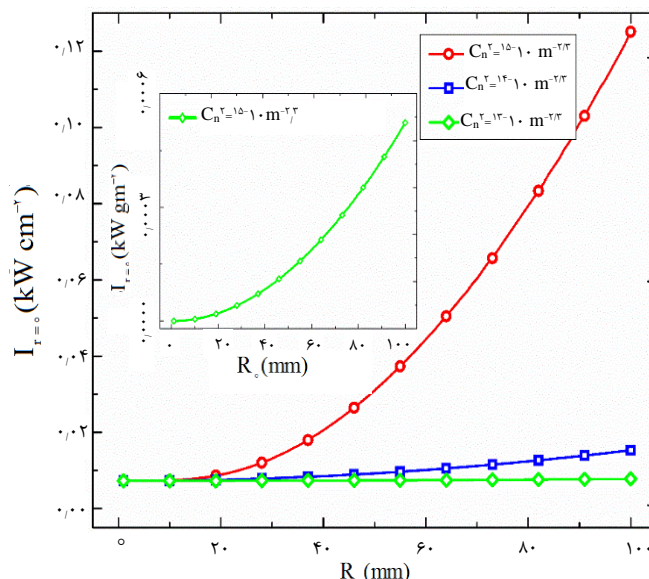
اما با توجه به مزیت‌های لیزرهای فیبری و ملزوم‌های ترکیب همدوس، استفاده از این نوع لیزرها در اولویت تحقیقات ترکیب همدوس و ناهمدوس باریکه قرار گرفته است. این نوع ترکیب، علاوه بر توان خروجی سامانه می‌تواند درخشندگی کل را نیز افزایش دهد. برای این کار باید جبهه‌ی موج و فاز هر یک از عناصر ترکیب را کنترل و خطای فازی را کاهش داد. برای انجام همدوس ترکیب باریکه‌های لیزری به باریکه‌های دارای پهنای خطی طیفی بسیار باریک ($\Delta\lambda/\lambda < 10^{-6}$)، جور شدگی قطبشی، قفل‌شدگی فازی^۱ و کیفیت پرتو بالا نیاز است [۴، ۷].

به بیانی بهتر، باریکه‌های ترکیب‌شونده به روش همدوس در حالت آرمانی باید از هر نظر کاملاً یکسان باشند. دست‌یابی به تمام این شرایط در عمل بسیار مشکل است و از این‌رو توان‌های بسیار بالای باریکه نمی‌تواند برای این منظور استفاده شود. اگر پرتو لیزرها از هر لحاظ یکسان نباشند، بازده ترکیب برابر واحد نخواهد بود [۷، ۳۰-۲۶].

در حال حاضر محدودیتی برای بیشینه تعداد کانال‌های ترکیب‌شونده برای ترکیب همدوس مشخص نشده است ولی حتماً باید تطبیق فاز نوری^۲ و قفل فازی برای تمام کانال‌ها انجام شود. اکثر ترکیب‌های همدوس لیزر فیبری یک بعدی هستند و آرایش دو بعدی به دلیل نیاز به عناصر تأخیر فازی با دقت خیلی کم بررسی شده است. زیرا خطای فازی مجاز با افزایش تعداد عناصر آرایه‌ی فیبری سنجیده می‌شود. یعنی با افزایش تعداد عناصر آرایه، مقدار خطای فازی مجاز کاهش می‌یابد [۲]. از این‌رو نمی‌توان روش افزایش نامحدود عناصر ترکیب‌شونده را برای افزایش توان بر روی هدف به کار برد و به جای آن باید سامانه‌های موجود را برای انتقال بیشینه‌ی انرژی بهینه کرد.

برای انتشار مؤثر باریکه در مسافت L ، باید طول همدوسی، Z_0 ، مجموعه‌ی لیزرها بیش‌تر از نصف مسافت انتشار باشد. به عبارت دیگر برای طول همدوسی Z_0 ، مسافت مؤثر انتشار کم‌تر از $2Z_0$ است [۴، ۱۴].

$$L < 2Z_0 \quad (12)$$



شکل ۲. بیشینه شدت مرکزی برحسب شعاع اولیه‌ی باریکه لیزر در محیط‌های مختلف آشفستگی.

شکل ۲ این واقعیت را نشان می‌دهد که با افزایش آشفستگی جو تغییرات شعاع باریکه‌ی و کیفیت باریکه‌ی لیزر اولیه تأثیر چندانی بر شدت باریکه‌ی روی هدف ندارد.

۴. نظریه‌ی ترکیب پرتوها

یک روش مناسب برای افزایش توان پرتو خروجی به دور از عوامل محدودکننده در لیزرهای واحد با توان بالا، استفاده از لیزرهای با توان پایین‌تر و ترکیب پرتو خروجی آن‌ها با هم است. در راستای دست‌یابی به کاربردهای انرژی هدایت شده تعداد زیادی لیزر با هم ترکیب می‌شود تا باریکه‌ی حاصل بتواند به رغم محدودیت‌هایی که از سوی اتمسفر اعمال می‌شود، در مسافت‌های طولانی انتشار یابد. پژوهش‌گران لیزرهای توان- بالا، روش‌های ترکیبی را به دو گروه ترکیب همدوس و ترکیب ناهمدوس تقسیم می‌کنند و روش‌های به کار گرفته شده را به عنوان زیر دسته‌های این دو گروه طبقه‌بندی می‌کنند [۴].

۱.۴ ترکیب همدوس پرتوها

شیوه‌ی همدوس ترکیب باریکه، برای انواع مختلف لیزرهای دیودی [۱۹-۱۷]، حالت جامد [۱، ۲۰، ۲۱] فیبری [۲۴-۲۲] و گازی [۲۵] انجام شده است. این شیوه برای افزایش درخشندگی باریکه‌ی نهایی با حفظ کیفیت پرتو خروجی است.

$$E(x, y, z) = e(x, y) \exp(-ikz) \quad (15)$$

که در آن،

که در آن $e(x, y)$ میدان الکتریکی عرضی و $k = 2\pi/\lambda$ عدد موج و λ طول موج در فضای آزاد است. با نام گذاری $r = (x, y)$ و توجه به این مسأله که $e(x, y)$ شامل مؤلفه‌های حقیقی و مجازی است، شدت میدان عرضی را می‌توان چنین نوشت،

$$I(r) = |e(r)|^2 = \left| \sum_j A_j u(r - r_j, w_j) \right|^2 \quad (16)$$

توزیع گاوسی $u(r, w)$ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$u(r, w) \rightarrow u(r, z, w) = \frac{w_0}{w(z)} \exp\left(-\frac{r^2}{w(z)^2}\right) \exp\left(-i\left[\frac{kr^2}{2R(z)} - \Psi\right]\right) \quad (17)$$

که در آن $w(z)$ شعاع باریکه در فاصله‌ی z و $R(z)$ شعاع انحنای جبهه‌ی موج است.

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{Z_0}\right)^2} \quad (18)$$

$$R(z) = Z_0 \left(\frac{z}{Z_0} + \frac{Z_0}{z}\right) \quad (19)$$

و هم‌چنین $Z_0 = \pi w_0^2 / \lambda$ طول ریلی^۱ و $\Psi = \tan^{-1}(z/Z_0)$ فاز جبهه‌ی موج است.

هر کدام از فیبرهای این آرایه، تک‌مد با کمره‌ی باریکه‌ی w_0 و فاصله‌ی بین (مرکز تا مرکز) دو فیبر d هستند. با فرض گاوسی بودن نمایه‌ی هر یک از فیبرها (تک‌مد بودن) میدان الکتریکی حاصل از باریکه‌ها در صفحه‌ی $z = 0$ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$E_{mn}(x, y, z=0) = A_{mn} \exp\left[-\frac{r^2}{w_0^2} + i\phi_{mn}\right] \quad (20)$$

$$Z_0 = \frac{\pi R_0^2}{\lambda} \quad (13)$$

برای انتشار یک باریکه‌ی منفرد در طول L ، باید طول پراش آن در معادله‌ی (۱۳) صدق کند. برای این منظور لازم است شعاع اولیه‌ی باریکه به حد کافی بزرگ باشد. برای یک آرایه‌ی N تایی از لیزر فیبری طول پراش را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$Z_{coh} \approx N \pi R_0^2 / \lambda \quad (14)$$

که در آن N تعداد کل لیزرهای ترکیب‌شونده و R_0 شعاع باریکه‌های لیزری موازی و قفل فازی شده است. برای افزایش بازده ترکیب باید طول همدوسی را افزایش داد. در نگاه اول می‌توان با افزایش تعداد لیزرها، N ، به این مهم دست یافت ولی در این صورت حتی اگر تمام لیزرها، قفل کامل فازی نیز باشند، نمایه‌ی عرضی شدت روی هدف شدیداً غیرگاوسی خواهد بود؛ به این صورت که الگوی تداخلی تشکیل شده در میدان دور، دارای حلقه‌های تک مد مرکزی و چند مد کناری خواهد بود و قسمت اعظم انرژی نیز در قسمت‌های لبه متمرکز خواهد شد. در نتیجه زاویه‌ی واگرایی افزایش خواهد یافت.

بهترین شکل آرایه برای چیدن فیبرها آرایه‌ای است که تقارن خوبی داشته باشد. چیدمان مورد نظر هر چه قدر به شکل دایره‌ی و البته دایره‌ی توپر نزدیک‌تر باشد، نتیجه بهتری حاصل خواهد شد ولی در عمل به دلیل فاصله‌ی غیرقابل حذف بین دو فیبر مجاور هم، داشتن آرایش دایره‌ای کامل ناممکن است. آرایش حلقه‌ای شش‌ضلعی به دلیل سازگاری طراحی مهندسی و نیز تقریب تقارن خوب نسبت به دایره برای چیدن فیبرها مناسب است. در بین آرایش‌های دو بعدی، در چیدمان شش‌ضلعی می‌توان تعداد عناصر ترکیب‌شونده‌ی بیش‌تری را در ناحیه‌ی مساحت داده شده در مقایسه با سایر آرایش‌ها جا داد [۵، ۷، ۲۴، ۲۶].

۲.۴ روابط حاکم بر ترکیب همدوس

برای شبیه‌سازی میدان حاصل از یک آرایه‌ی فیبری، از میدان اپتیکی حاصل از یک فیبر تک‌مد شروع کرده و فرض می‌کنیم که توزیع شدت هر یک از باریکه‌های ترکیب‌شونده به صورت گاوسی است [۸-۴، ۲۰، ۲۶].

1. Rayleigh length

شدت کل در ترکیب همدوس به میدان الکتریکی کل بستگی دارد. شدت میدان الکتریکی کل بر روی هدف به عواملی چون برانید میدان الکتریکی عناصر فیبری، دامنه‌ی میدان، فاصله‌ی جدایی عناصر فیبری و فاز اولیه‌ی آن‌ها وابسته است. الگوی توزیع شدت دارای یک قله‌ی مرکزی و تعدادی لایه‌ی کناری است؛ به صورت کلی قادر به حذف لایه‌های کناری نیستیم، ولی با کنترل بعضی پارامترها می‌توان شدت ناحیه‌ی کناری را کاهش و به شدت قله‌ی مرکزی افزود. توزیع شدت در میدان دور تحت تأثیر پارامترهایی همچون خطای کنترل فاز، کنترل دامنه، کنترل قطبش، موقعیت هر کدام از باریکه‌ها، پراش‌دهی کوچک‌تر از واحد قرار می‌گیرد که از میان آن‌ها کنترل خطای فازی و پراش‌دهی بسیار حیاتی هستند. پارامتر پراش‌دهی به صورت نسبت اندازه‌ی لکه‌ی هر یک از باریکه‌های لیزر به فاصله‌ی جدایی فیبرها تعریف می‌شود [۴، ۷، ۲۶].

$$f = \frac{\pi w}{d} \quad (26)$$

با کاهش d و افزایش f ، شدت و درخشندگی لکه‌ی مرکزی افزایش و شدت و تعداد لکه‌های کناری کاهش می‌یابد.

۵. یافته‌ها و بحث

بیش‌تر پروژه‌های ترکیب همدوس در فاصله‌ی کم‌تر از ۵ km اجرا شده است. پارامتر پراش‌دهی بالا باعث کاهش اثر لبه و انتقال بیش‌تر انرژی به لکه‌ی مرکزی و در نتیجه افزایش بازده ترکیب همدوس می‌شود. در حالت آرمانی اگر $f=1$ باشد اثرات لبه ناپدید شده و مجموع انرژی ترکیبی در لکه‌ی مرکزی قرار می‌گیرد. در این مقاله محدوده‌ی انتشار ترکیب همدوس ۱۹ باریکه‌ی لیزر فیبری با شعاع باریکه‌ی اولیه‌ی ۱۵ mm و فاصله‌ی جدایی مرکز تا مرکز دو باریکه‌ی مجاور حدود ۳۳ mm را به فاصله‌ی ۱۰ km گسترش می‌دهیم. در عمل فاصله‌ی هر باریکه می‌تواند به وسیله‌ی ابزارهای نوری-مکانیکی قابل تنظیم، کاهش یابد. در نهایت این فاصله کم‌تر از ۳ mm در یک طرح‌واره همانند یک شش‌ضلعی منتظم است، همچنین در این طرح پارامتر پراش‌دهی در حدود ۰/۹۱ است.

که در آن A_{mn} دامنه و φ_{mn} فاز اولیه است و

$$r^2 = (x - x_{mn})^2 + (y - y_{mn})^2 \quad (21)$$

و (x_{mn}, y_{mn}) موقعیت مرکز هر فیبر است.

$$\begin{aligned} x_{mn} &= md \cdot \cos \left[(n-1) \frac{2\pi}{\epsilon m} \right] \\ y_{mn} &= md \cdot \sin \left[(n-1) \frac{2\pi}{\epsilon m} \right] \end{aligned} \quad (22)$$

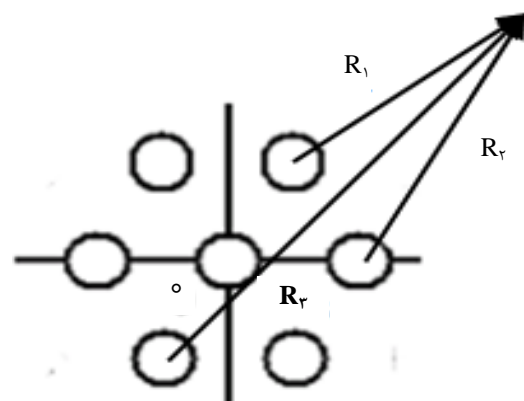
که در آن m شماره‌ی حلقه‌ی شش‌ضلعی و n شماره‌ی فیبر از سمت مثبت محور x است. $m = 0$ حالت بدون حلقه‌ی محیطی و تنها یک تک فیبر را نشان می‌دهد. فاصله‌ی مرکز تا مرکز دو فیبر برابر d بوده و تعداد کل عناصر فیبری ترکیب‌شونده با m حلقه برابر N است. نحوه قرارگیری فیبرها در کنار هم در شکل ۳ نشان داده شده است.

$$N = 1 + \sum_{m=1}^M \epsilon m \quad (23)$$

میدان الکتریکی کل و شدت آرایه‌های لیزری بر روی هدف با معادلات زیر به دست می‌آید:

$$E(x, y, z) = \sum_m \sum_n E_{mn}(x, y, z) \quad (24)$$

$$I(x, y, z) = E(x, y, z) E^*(x, y, z) \quad (25)$$



شکل ۳. فاصله‌های هر کدام از فیبرها در آرایه‌ی فیبری برای محاسبه‌ی میدان الکتریکی در فضا.

از آن جایی که خواص ترکیب همدوس برای محیط‌های با تلاطم متوسط به پایین، خود را نشان می‌دهد، در محیط‌های پرتلاطم استفاده از ترکیب همدوس صرفاً تحمل مشکلات و پیچیدگی‌های متعدد آن بدون بهره‌مندی از مزیت‌های آن است [۴، ۷، ۱۴]. در این قسمت برای محاسبه‌ی شعاع لکه روی هدف، صرفاً محیط با تلاطم پایین ($m^{-2/3} = C_n^{10-15}$) را مدنظر قرار می‌دهیم و از محیط‌های با تلاطم متوسط و شدید صرف‌نظر می‌کنیم. همچنین برای محاسبات شدت در میدان دور، از انتگرال پراش فرانیهوفر و از نرم‌افزار^۲ مطلب استفاده شد [۷، ۳۰].

شکل ۴ الگوی ترکیب همدوس ۱۹ لیزر فیبری در فاصله‌های مختلف را با استفاده از معادلات (۲۴) و (۲۵) برای طول موج ۱۰۷۰ nm، با شعاع لکه‌ی خروجی از باریکه‌ساز ۱۵ mm و فاصله‌ی جدایی ۳۳ mm برای هر فیبر را نشان می‌دهد. شعاع هدایت‌کننده باریکه برابر ۶۶ mm است. شکل ۴ الف الگوی خروجی پرتو در $Z = 0$ است. شکل ۴-ب و ۴-ج به ترتیب، الگوی خروجی شدت پرتو در فاصله‌ی $Z = 500$ m و $Z = 2$ km است. واضح است که قله‌ی انرژی ترکیب باریکه‌ها به سمت مرکز نمایه کشیده شده است و لکه‌های کناری که کسری از انرژی باریکه‌های اولیه را در خود دارند به طور چشمگیری ایجاد می‌شوند. شکل ۴-د توزیع شدت میدان دور به شعاع تقریبی ۵۰ cm را در فاصله $Z = 10$ km نشان می‌دهد. شعاع لکه‌ی مرکزی ($1/e^2$ برابر بیشینه‌ی شدت مرکزی) ۵٫۹ cm و شعاع لکه‌های کناری از مرکز قله‌ی شدت برابر ۳۳٫۲ cm است. توان کل انتقال یافته برابر ۵۷ kW است. ۱۲٪ از این توان کل توسط لکه‌های کناری و ۸۸٪ آن توسط لکه‌ی مرکزی به شعاع $R_{cc} = 5,9$ cm با چگالی توان $0,45$ kW cm^{-۲} انتقال می‌یابد. ما بر این باوریم که این بهترین نتیجه‌ی انتشار یافته برای ترکیب همدوس تاکنون است.

۶. اثر فاز بر روی ترکیب همدوس

ترکیب همدوس شدیداً به تأخیر فاز حساس بوده و نیازمند عناصر با دقت و پایداری بالا برای کنترل آن است. دست‌یابی به کیفیت بالای باریکه‌ی ترکیب همدوس بسیار مشکل است، زیرا خطای جبهه‌ی موج آرایه‌ی فیبری باید کسری از طول موج باشد. همچنین طول موج در حد $1 \mu\text{m}$

در این مقاله از لیزرهای فیبری قطبیده با توان هر کدام در حدود ۳kW در شبیه‌سازی میدان دور در راستای دست‌یابی به توان ۵۰ kW بر روی هدف استفاده شده است. برای کاهش واگرایی پرتو فیبر خروجی از باریکه‌سازهای ویژه استفاده می‌شود. در شبیه‌سازی‌ها پارامترهای یک باریکه به شماره‌ی ۹۳۳۶-۱X۰۱ ساخت شرکت اپتو-اسکاند^۱ که در جدول ۳ آورده شده است، مورد استفاده قرار داده‌ایم.

در معادله‌ی (۹) شعاع باریکه‌ی یک لیزر منفرد روی هدف به دست آمد. اگر در این معادله، شعاع باریکه‌ی منفرد، R_0 ، را با شعاع هدایت‌گر باریکه، R_{BD} جای‌گزین کنیم می‌توانیم شعاع باریکه‌ی لیزری ترکیب شده را بر روی هدف به دست آوریم.

$$R_{cc}(L) = \left(\frac{\lambda L}{\pi R_{BD}} \right) \left((M^r)^2 + 2,9 \left(\frac{R_{BD}}{r_0} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (27)$$

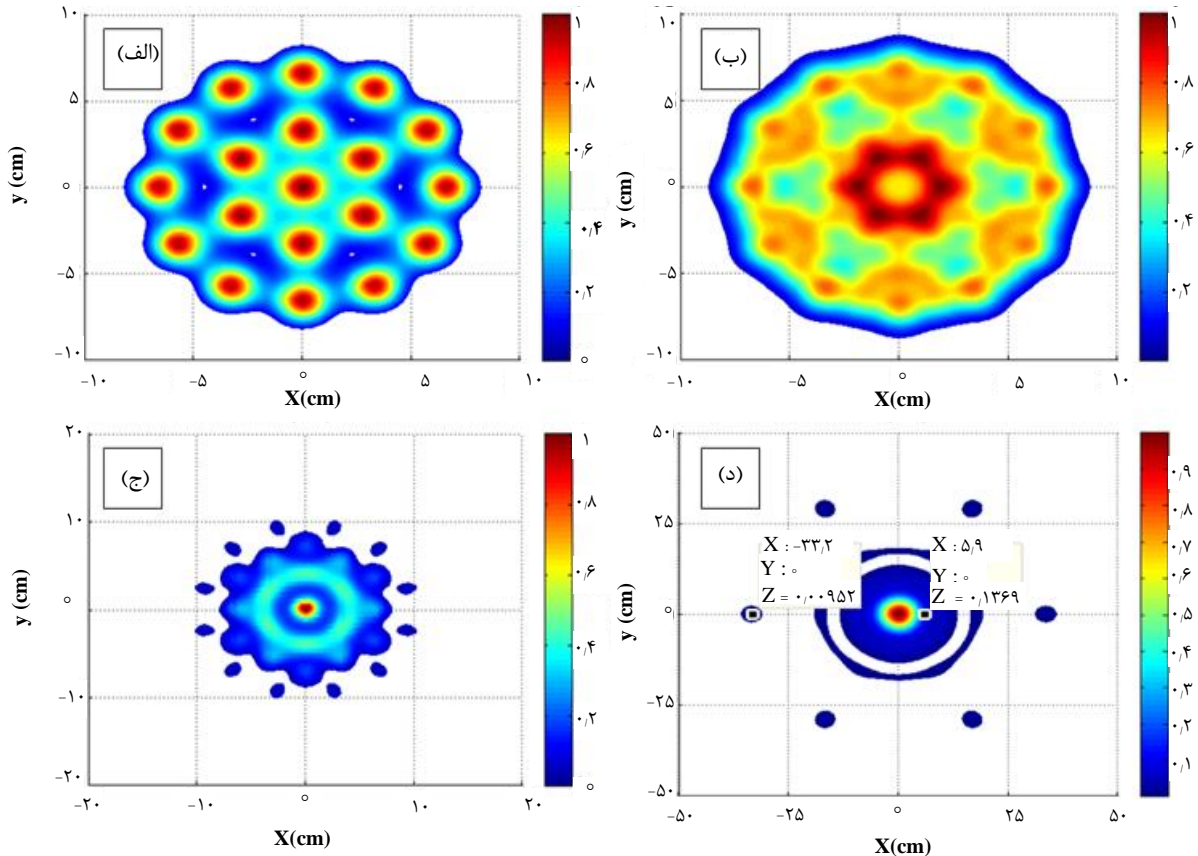
که در آن $R_{BD} = Md$ شعاع هدایت‌گر باریکه است. شعاع هدایت‌گر باریکه، شعاع خارجی شش‌ضلعی بیرونی است که مجموعه‌ی باریکه‌های لیزرهای ترکیب‌شونده در آن شعاع قرار گرفته‌اند. با فرض این که شعاع باریکه‌ی خروجی از باریکه‌ساز ۱۵ mm و فاصله‌ی جدایی مرکز دو باریکه از هم برابر $d = 33$ mm با پارامتر پراش $f = 0,91$ است؛ می‌توان با 19 لیزر فیبری تک‌مد قطبیده با توان ۳ kW با شعاع هدایت‌گر باریکه‌ی $R_{BD} = 66$ mm و شعاع باریکه‌ی نهایی $R_{cc} = 5,9$ cm در فاصله $Z = 10$ km به سطح مقطع پرتو 110 cm^۲ و توان ۵۰ kW بر روی هدف رسید.

جدول ۳. پارامترهای باریکه‌ساز ساخت شرکت اپتوسکاند

شماره‌ی ساخت	۹۳۳۶-۱X۰۱
قطر مکانیکی (mm)	۶۵
طول (mm)	۳۱۲
قطر اپتیکی (mm)	۵۰
فاصله‌ی کانونی (mm)	۲۵۰
وزن (kg)	۱٫۶
توان اپتیکی قابل تحمل (kW)	۵

است و با افزایش تعداد عنصرهای ترکیب‌شونده، این پیچیدگی

بسیار شدیدتر نیز می‌شود.



شکل ۴. ترکیب ۱۹ باریکه در آرایش شش ضلعی با پارامترهای $d = ۳۳ \text{ mm}$ ، $w_0 = ۱۵ \text{ mm}$ ، $M = ۲$ با شعاع و فاصله‌های (الف) $r = ۱۰ \text{ cm}$ ، $z = ۰$ (ب) $z = ۵۰۰ \text{ m}$ ، $r = ۱۰ \text{ cm}$ (ج) $r = ۲۰ \text{ cm}$ ، $z = ۲ \text{ km}$ و (د) $r = ۵۰ \text{ cm}$ ، $z = ۱۰ \text{ km}$

$$\Delta\theta = \frac{\partial n}{\partial \lambda} \Delta\lambda \frac{r\pi}{\lambda} L \quad (۲۸)$$

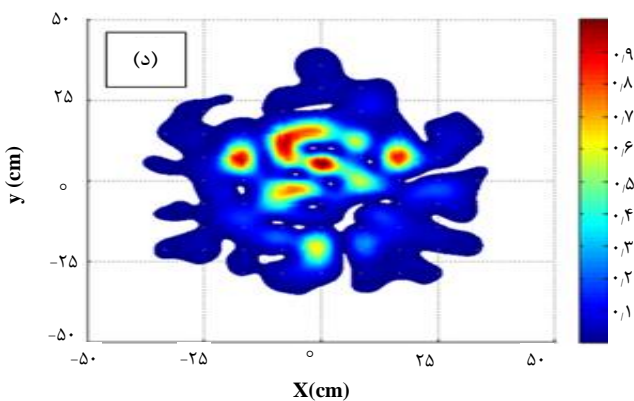
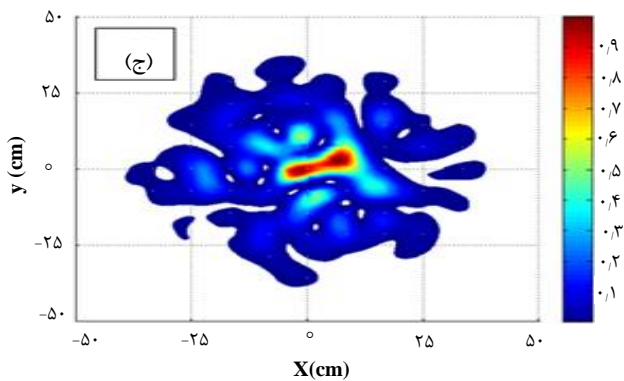
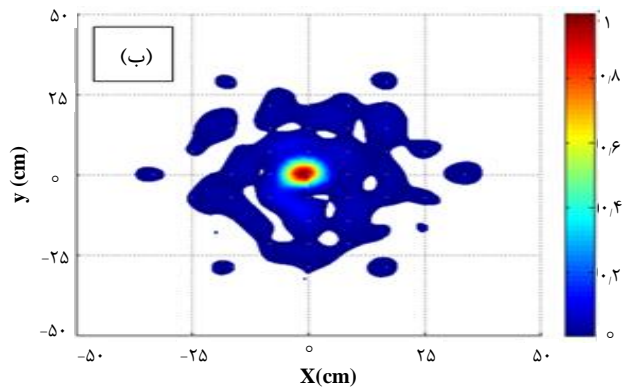
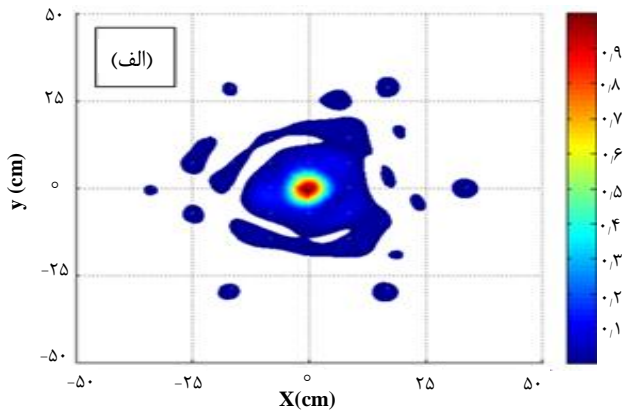
$\Delta\theta$ باید کم‌تر از ۲π باشد تا همدوسی فازی بر روی هدف حفظ شود. در رابطه فوق $\partial n / \partial \lambda$ تغییرات ضریب شکست هوا برحسب طول موج است.

$$\Delta\theta < ۲\pi \Rightarrow \frac{\Delta\lambda}{\lambda} < \left(L \frac{\partial n}{\partial \lambda} \right)^{-1} \quad (۲۹)$$

به عنوان مثال، برای داشتن همدوسی فازی در طول موج $\lambda = ۱ \text{ }\mu\text{m}$ که در آن $\partial n / \partial \lambda = ۳ \times ۱۰^{-۶}$ بعد از طی مسافت $L = ۱۰ \text{ km}$ باید $\Delta\lambda / \lambda < ۳,۳ \times ۱۰^{-۶}$ باشد. این شرط برای لیزرهای توان- بالا (چندین کیلووات) به سختی قابل دست‌یابی است.

انواع مختلفی از منابع خطای فازی برای یک آرایه‌ی فیبر وجود دارد که در مرجع [۱۶] شرح داده شده است. در ترکیب همدوس، فاز هر عنصر لیزری را می‌توان به جای قفل کردن به

برای انجام عمل قفل فازی باید اطلاعات فاز خروجی لیزر به داخل نوسانگر هرکدام از لیزرها بازگردانده شود. برای مؤثر بودن فرایند ترکیب همدوس و افزایش بازده انتشار، زمان لازم برای بازگرداندن اطلاعات فاز باریکه‌ی خروجی به داخل لیزرها باید کوچک‌تر از زمان همدوسی لیزر، $\tau_c = 1 / \pi \Delta f$ ، باشد که در آن Δf پهنای بسامدی باریکه‌ی لیزر است [۷-۵، ۱۴، ۲۹-۲۶]. در لیزرهای توان- بالا از مرتبه‌ی چندین کیلووات، انجام ترکیب همدوس خیلی مشکل است. برای این دسته از لیزرها پهنای خط عموماً از مرتبه‌ی $\Delta f \approx ۱ \text{ GHz}$ و زمان همدوسی $\tau_c \approx ۰,۳ \text{ ns}$ است که اصلاح و تصحیح فاز ورودی به نوسانگر خیلی مشکل خواهد بود. علاوه بر آن لیزرهای توان- بالا که پهنای طیفی عریضی دارند، دچار بازشدگی فازی به دلیل پاشندگی هوا می‌شوند. بازشدگی فازی یک لیزر با پهنای طیفی $\Delta\lambda$ بعد از انتشار مسافت L به صورت زیر بیان می‌شود:



شکل ۵. نمایه‌ی شدت در میدان دور در ترکیب همدوس ۱۹ لیزر فیبری در فاصله‌ی ۱۰ km. (الف) $\varphi_{av} = 61^\circ$, $SD = 10.8^\circ$, (ب) $SD = 40.8^\circ$, $\varphi_{av} = 1^\circ$ (ج) $\varphi_{av} = 37.8^\circ$, $SD = 80.7^\circ$, (د) $\varphi_{av} = 21.7^\circ$, $SD = 106.3^\circ$

نزدیک‌ترین عنصر ترکیب‌شونده، به صورت مستقل به رزوناتور مرجع قفل کرد. مزیت عمده‌ی این روش این است که در آن خطاهای فازی لیزرهای ترکیب‌شونده باهم جمع نمی‌شود و در نتیجه این سیستم قابلیت افزایش تعداد لیزرهای ترکیب‌شونده و افزایش توان ترکیب شده را دارد [۵]. با در نظر گرفتن φ_i به عنوان خطای فازی هر عنصر لیزری، می‌توان توزیع احتمال خطای فازی هر عنصر را به صورت گاوسی با مقدار میانگین صفر به صورت زیر نوشت:

$$f(\phi_i) = \frac{1}{\sqrt{r\pi}} e^{-\phi_i^2/r} \quad (30)$$

با افزودن خطای فازی φ_i به معادله‌ی (۳۰)، صفر در نظر نگرفتن آن) می‌توان تأثیر آن را در نمایه‌ی باریکه‌ی لیزر ترکیب شده در میدان دور مطالعه کرد. انحراف از معیار خطاهای فازی عناصر ترکیب‌شونده نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \bar{\phi})^2} \quad (31)$$

که در آن φ_i خطای فازی المان i ام و $\bar{\phi}$ میانگین خطای فازی باریکه‌های ترکیب‌شونده است.

$$\bar{\phi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \phi_i \quad (32)$$

وجود خطای فازی بین عنصرهای لیزری ترکیب‌شونده منجر به پراکندگی انرژی لکه‌ی مرکزی به لکه‌های کناری و در نتیجه منجر به انحراف باریکه‌ی ترکیب شده و کاهش بازده ترکیب می‌شود. به هم‌ریختگی نمایه‌ی شدت در اثر خطای فاز در شبیه‌سازی انجام شده برای ۱۹ لیزر در فاصله‌ی ۱۰ km در شکل ۵ نشان داده شده است. این اثرات مضر و مخرب با افزایش تعداد عنصرهای ترکیب‌شونده، بیش‌تر خواهد شد. زیرا با افزایش تعداد لیزرهای ترکیب‌شونده، مقدار خطای فازی مجاز کاهش می‌یابد و کنترل فاز همه‌ی عناصر پیچیده‌تر می‌شود.

ضرورتی ندارد و می‌توان با ترکیب ناهمدوس اما با تعداد لیزرهای بیش‌تر یا با توان‌های بسیار بالاتر برای هر لیزر به توان مورد نیاز در جهت کاربردهای انرژی هدایت شده دست یافت.

تشکر و قدردانی

حمایت مالی این پژوهش به عنوان بخشی از یک پروژه‌ی پژوهشی (طراحی سیستم لیزر با استفاده از ترکیبی از آرایه‌های پرتوهای لیزری) توسط دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب انجام شده است

مراجع

1. G.D. Goodno, H. Komine, S.J. McNaught, S.B. Weiss, S. Redmond, W. Long, R. Simpson, E.C. Cheung, D. Howland, P. Epp, M. Weber, M. McClellan, J. Sollee, H. Injeyan, *Optics letters*, **31**, 9, 1247-1249 (2006).
2. A.A. Ishaaya, N. Davidson, A.A. Friesem, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **15**, 2, 301-311 (2009).
3. Liran Shimshi, Amiel A. Ishaaya, Vardit Ekhouse, Nir Davidson, Asher A. Friesem, *Applied physics letters*, **88**, 4, 041103 (2006).
4. P. Sprangle, J. Penano, A. Ting, NAVAL RESEARCH LAB WASHINGTON DC (2006).
5. Li. Yongzhong, Liejia Qian, Daquan Lu, Dianyuan Fan, Shuangchun Wen, *Optical Fiber Technology*, **15**, 3, 226-232 (2009).
6. Pu hou, Zejin Liu, Xiaojun Xu, Zilun Chen, Xiaolin Wang, *Optics & Laser Technology*, **41**, 3, 268-271 (2009).
7. Phillip prangle, Bahman Hafizi, Antonio Ting, Richard Fischer, *Applied Optics*, **54**, 31, F201-F209 (2015).
8. M.A. Vorontsov, T. Weyrauch, *Applied Optics*, **55**, 35, 9950-9953 (2016).
9. I. Dajani, A. Flores, R. Holten, B. Anderson, B. Pulford, Th. Ehrenreich, In *Proc. SPIE.*, (2016).
10. C.C. Chen, *Method for Estimating the Thermal Blooming Effect*, RAND CORP SANTA MONICA CALIF (1975).
11. Steve Gibson, Tsu-Chin Tsao, Michael C. Roggemann, Timothy J. Schulz, Allen Tannenbaum, Eric Magee, Matthew Whiteley, Ben G Fitzpatrick, Yun Wang, Mikhail Belenkii, *Atmospheric Propagation of High Energy Lasers: Modeling, Simulation, Tracking, and Control.*, California univ los angeles dept of mechanical amd aerospace engineering (2008).

افزایش خطای فاز موجب انحراف بیش‌تر مسیر مستقیم و هم‌چنین تضعیف حداکثری شدت لکه‌ی مرکزی می‌شود. به عبارتی دیگر با افزایش عناصر لیزری مقدار تخریب نمایه‌ی باریکه ترکیب شده بر روی هدف افزایش می‌یابد که موجب پراکندگی انرژی از لکه‌ی مرکزی و کاهش بازده ترکیب می‌شود.

۷. نتایج

محدوده‌ی توانی مورد نیاز برای استفاده در کاربردهای انرژی هدایت شده از مرتبه ۱۰۰ kW است. برای رسیدن به سطح توان مورد نیاز برای این کاربردها، لازم است که تعداد زیادی لیزر ترکیب و باریکه‌ی حاصل در فاصله‌های چندین کیلومتری در فضای آشفته و جو منتشر شود. بهترین روش ترکیب در سطح آشفته‌ی پایین ترکیب همدوس است. در این روش شدت ایجاد شده بر روی هدف با توان دوم تعداد لیزر مرتبط است، در نتیجه به توان کم‌تری برای کاربرد مورد نظر نیاز دارد. در طراحی صورت گرفته برای ترکیب همدوس لیزرهای فیبری می‌توان به توان ۵۰ kW در فاصله‌ی ۱۰ km دست یافت. در شبیه‌سازی این طرح از ۱۹ لیزر فیبری قطبیده به توان ۳ kW استفاده شده است. شعاع هدایت‌کننده باریکه روی هدف در فاصله‌ی $z = 10 \text{ km}$ برابر $R_{\text{target}} = 5.9 \text{ cm}$ ، چگالی توان بیش از 450 W cm^{-2} و بازده ترکیب در این شبیه‌سازی ۸۸٪ به دست آمده است. بازده ترکیب، نسبت توان در شعاع لکه‌ی مرکزی (این شعاع به صورت $1/e^2$ برابر شدت مرکزی محاسبه می‌شود) به توان کل است. براساس اطلاعات نویسندگان، بهترین نتیجه گزارش شده در ترکیب همدوس تاکنون نتایج این شبیه‌سازی است.

مهم‌ترین چالش ترکیب همدوس برقراری شرایط فقل فازی بین همه عنصرهای ترکیب شونده‌ی لیزری است. به گونه‌ای که اگر خطای فازی بین لیزرهای ترکیب شونده از حد مجاز بیش‌تر شود، ترکیب همدوس دچار اختلال می‌شود و در نتیجه کاهش بازده ترکیب را در پی خواهد داشت. هم‌چنین اگر آشفته‌ی و تلاطم محیط انتشار باریکه‌ی لیزری از نوع متوسط به بالا باشد، تحمل مشکلات و پیچیدگی‌های ترکیب همدوس

12. J.R. Penano, P. Sprangle, B. Hafizi, *Propagation of high energy laser beams through atmospheric stagnation zones*, Naval research lab washington dc beam physics branch (2006).
13. P. Sprangle, J. Penano, B. Hafizi, *Propagation of high energy laser beams in various environments*, Naval research lab washington dc (2007).
14. Ph. Sprangle, A. Ting, J. Penano, R. Fischer, B. Hafizi, *IEEE Journal of quantum electronics*, **45**, 2, 138-148 (2009).
15. C.R. Fussman, *High energy laser propagation in various atmospheric conditions utilizing a new, accelerated scaling code*, Monterey, California: Naval Postgraduate School (2014).
16. P. Sprangle, J. Penano, B. Hafizi, *Optimum wavelength and power for efficient laser propagation in various atmospheric environments*, Naval research lab washington dc (2005).
17. T. Fan, *Coherent beam combining of diode arrays. in High Power Diode Lasers and Systems Conference (HPD), 2013*, 2013. IEEE.
18. T.Y. Fan, *IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics*, **11**, 3 567-577 (2005).
19. Shawn M. Redmond, Kevin J. Creedon, Jan E. Kansky, Steven J. Augst, Leo J. Missaggia, Michael K. Connors, Robin K. Huang, Bien Chann, Tso Yee Fan, George W. Turner, and Antonio Sanchez-Rubio, et al., *Optics Letters*, **36**, 6, 999-1001 (2011).
20. Q. Wang, L. Yan, *In Lasers and Electro-Optics Society, 2006. LEOS 2006. 19th Annual Meeting of the IEEE.* (2006). IEEE.
21. M. Wickham, *In Conference on Lasers and Electro-Optics*, Optical Society of America (2010).
22. ZeJin Liu, Pu Zhou, XiaoJun Xu, XiaoLin Wang and YanXing Ma., *Science China Technological Sciences*, **56**, 7, 1597-1606 (2013).
23. Stuart J. McNaught, Joshua E. Rothenberg, Peter A. Thielen, Michael G. Wickham, Mark E. Weber, and Gregory D. Goodno, *in Advanced Solid-State Photonics. Optical Society of America* (2010).
24. C.X. Yu, J.E. Kansky, S.E.J. Shaw, D.V. Murphy, C. Higgs, *In Lasers and Electro-Optics, 2006 and 2006 Quantum Electronics and Laser Science Conference, CLEO/QELS 2006. Conference on.* 2006. IEEE.
25. G.D. Goodno, C.-C. Shih, J.E. Rothenberg, *Optics Express*, **18**, 24, 25403-25414 (2010).
26. Xinyan Fan, Jingjiao Liu, Jinsheng Liu, Jingli Wu, *Optics & Laser Technology*, **42**, 2, 274-279 (2010).
27. Gregory D. Goodno, Charles P. Asman, Jesse Anderegg, Steve Brosnan, Steve Brosnan, Eric C. Cheung, Dennis Hammons, Hagop Injeyan, Hiroshi Komine, William H. Long, Michael McClellan, Stuart J. McNaught, Shawn Redmond, Randall Simpson, Jeff Sollee, Mark Weber, S. Benjamin Weiss, Michael Wickham, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **13**, 3, 460-472 (2007).
28. Gregory D. Goodno, Stuart J. McNaught, Joshua E. Rothenberg, Timothy S. McComb, Peter A. Thielen, Michael G. Wickham, and Mark E. Weber, *Optics Letters*, **35**, 10, 1542-1544 (2010).
29. C.X. Yu, S.J. Augst, S.M. Redmond, K.C. Goldizen, D.V. Murphy, A. Sanchez, T.Y. Fan, *Optics Letters*, **36**, 14, 2686-2688 (2011).
30. Guangsen Ren, Xiaojun Xu, Wuming Wu, Haotong Ma, Yu Ning, *Optics Communications*, **344**, 33-37 (2015).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

**استناد به این مقاله**

سید حامد قاسمی، احد حق پرست (۱۳۹۸)، بررسی مشخصه‌های ترکیب همدوس ۱۹ باریکه‌ی لیزر فیبری برای دست‌یابی به توان‌های چند ده کیلووات در فاصله‌ی ۱۰ کیلومتری، ۸۸، ۶۰-۷۱

DOI: [10.24200/nst.2019.999](https://doi.org/10.24200/nst.2019.999)

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_999.html