بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و
دوازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸

تاثیر نحوه توزیع باریکه ها در میدان نزدیک بر توزیع شدت و توان در سبد در میدان دور در ترکیب همدوس و ناهمدوس باریکه های لیزری

ناصر سیاهوشی، مسلم همدمی، آتوسا سادات عربانیان، رضا مسعودی*

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

n.siahvashi.r@gmail.com, moslem.hamdami@gmail.com, a_arabaninan@sbu.ac.ir, *r-massudi@sbu.ac.ir

چکیده - دستیابی به باریکه ای با توان بالا و کیفیت مناسب مهمترین هدف ترکیب باریکه های لیزری می باشد. آرایش هندسی و نحوه چینش باریکه ها در دهانه تابش، نقش بسیار اثر گذاری در کیفیت باریکه ترکیبی دارد. با قرارگیری باریکه ها در آرایش پهلو به پهلو ی تک خط، دو خط موازی، سه خط موازی و شش خط موازی در دهانه تابش و برای فاصله ۲,۵ کیلومتری صفحه مشاهده، تاثیر نحوه توزیع باریکه در دهانه تابش بر ترکیب همدوس و ناهمدوس باریکه ها بررسی شده است. برای این منظور توزیع شدت میدان نزدیک و دور برای هر دو حالت ارائه شده است. همچنین با ارائه نمودار توان در سبد، مقدار توان جایگزیده در مرکز صفحه مشاهده در میدان دور برای تمامی آرایش ها بررسی شده است. نتایج حاصل نشان می دهد که با ثابت در نظر گرفتن اندازه کمره باریکه ها و نیز فاصله بین آن ها در دهانه تابش، و با تغییر توزیع باریکه ها به سمت آرایش مربعی، مقدار توان در سبد در میدان دور بیش از دو مرتبه افزایش و پهنای توزیع شدت برای قله مرکزی یک مرتبه کاهش می یابد. در نهایت نتایج نشان می دهد که پروفایل باریکه ترکیبی نهایی دارای تقارنی مشابه با چینش باریکه ها در دهانه تابش است.

کلید واژه- آرایش هندسی، ترکیب همدوس و ناهمدوس باریکه ها، توان درسبد، توزیع شدت، دهانه تابش

The effect of beams distribution in the near field on the intensity distribution and power in the bucket in the far field in laser beams combination

Naser Siahvashi, Moslem Hamdami, Atosa Sadat Arabanian, *Reza Massudi

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, G.C.Evin, Tehran, Iran

Abstract- Achieving a high power and high quality beam is the most important purpose of laser beam combination. The geometrical arrangement and the beam distribution in array aperture have effective role in beam combination quality. By applying the beams in the side-by-side arrangements of a single line, two parallel lines, three parallel lines, and six parallel lines in array aperture, and with 2.5 km distance of observing plane, the effect of the beam distribution at array aperture in coherent and incoherent combination has been examined. For this purpose, the distribution of near and far field intensities for two modes is presented. Also by presenting the power in the bucket diagram, the amount of power localized at the center of the far-field observing plane for all arrangements is investigated. The results show that for a constant beam waist and constant distance between beams in array aperture, the amount of power in the bucket increases more than two order of magnitude, and the intensity distribution width of central peak decreases more than one order by changing the beam distribution to the square arrangement. Finally, the results show that the profile of the combined beam has the same symmetry as the beams are arranged in the array aperture.

Keywords: Geometrical array, coherent and incoherent beam combining, power in bucket. Intensity distribution, array aperture

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

مقدمه

پس از اختراع لیزر در دهه‌ی ۱۹۶۰ و کاربردهای فراوان آن در حوزه‌های مختلف، یکی از اهداف پژوهشگران این حوزه، دستیابی به باریکه‌های لیزری با کیفیت و توان بالاتر بوده است. امروزه باریکه های لیزری پر توان در بسیاری از صنایع مختلف همچون جوش کاری، برش کاری، سوراخ کاری، صنایع نظامی و حتی کاوش در پدیده های علوم بنیادی همچون همجوشی هسته ای مورد استفاده قرار گرفته است[۱]. تلاش های زیادی نیز برای افزایش توان باریکه‌های لیزری صورت گرفته است و روش های متعددی نیز ارائه شده است که انتخاب ماده فعال مناسب با کارایی و بازدهی بیشتر و نیز استفاده از پیکربندی نوسان کننده‌ی اصلی-تقویت کننده‌ی توان (MOPA) از جمله مهمترین این روش ها می باشند. البته مشکلات و پیچیدگی‌هایی همچون محدودیت خنک سازی، ظهور اثرات گرمایی و بروز اثرات غیرخطی از جمله عوامل محدود کننده‌ی توان در این روش‌ها به شمار می‌روند. علاوه بر آن آستانه تخریب مواد، امکان ساخت لیزرهایی با توان مراتب بالا را غیرممکن می سازد. در نهایت روش ترکیب باریکه های لیزری، یعنی، طراحی و ساخت چند لیزر با توان پایین‌تر و سپس ترکیب آن‌ها به عنوان جدیدترین و کاربردی ترین روش دستیابی به باریکه‌ای با توان بالاتر ارائه شده است[۲-۴]. مطالعه بر روی ترکیب باریکه‌های لیزر از ابتدای دهه‌ی ۱۹۹۰ آغاز شد و سپس تلاش برای یافتن راهی به منظور افزایش بازده و کیفیت باریکه ترکیبی ادامه پیدا کرد. نحوه چینش باریکه ها یکی از مهمترین فاکتورها به منظور دست یابی به باریکه ترکیبی با توان و کیفیت مناسب می باشد. به این منظور در سال ۲۰۰۹ آنالیز تئوری و محاسبات عددی مربوط به آرایش حلقه های شش ضلعی برای ترکیب همدوس و غیر همدوس توسط یانگ زونگ لی و همکارانش، مورد مطالعه قرار گرفته و پارامترهایی همچون درخشندگی و کیفیت باریکه بررسی شده است[۵]. در سال ۲۰۱۰ فن و همکارانش با استفاده از ۷ باریکه لیزری در آرایش شش ضلعی به بررسی میزان جایگزیدگی انرژی در لوب مرکزی باریکه ترکیبی پرداخته اند[۶]. در ادامه در سال ۲۰۱۹ جابزینسکی و همکارانش به بررسی اثر نوع پروفایل و درجه همدوسی روی عملکرد ترکیب پهلو به پهلوی باریکه های لیزری پرداخته اند[۷]. از جمله پارامترهای مهم در چینش هندسی باریکه ها در میدان نزدیک به روش پهلو به پهلو، تاثیر مکان قرار گیری هر باریکه در دهانه تابش است. در این مقاله با بررسی آرایش های پهلو به پهلو ی مختلف تک خط، دو خط موازی، سه خط موازی و شش خط موازی تاثیر نحوه توزیع باریکه ها در میدان نزدیک، بر ترکیب همدوس و ناهمدوس باریکه ها، بررسی شده است. برای این منظور توزیع شدت میدان نزدیک و دور برای هر آرایش ارائه شده تا بتوان با بررسی پهنای توزیع شدت، مقایسه ای بین آرایش های مختلف ارائه نمود. همچنین با ارائه نمودار توان در سبد، مقدار توان جایگزیده در مرکز صفحه مشاهده در میدان دور برای تمامی آرایش ها بررسی شده است.

اصول و تئوری

برای محاسبه توزیع شدت حاصل از ترکیب باریکه ها در صفحه مشاهده، میدان اپتیکی هر باریکه به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$E_n(x.y.z) = A_n(x.y.z) \times \exp\left[-ikz + i\phi_n(x.y.z)\right] \quad (1)$$

که $A_n(r)$ توزیع دامنه میدان، $\phi_n(r)$ توزیع فاز مربوط به هر باریکه پیرامحوری می باشد. برای باریکه های با پروفایل عرضی گاوسی داریم:

$$A_n(x.y.z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} exp\left(-\frac{(x-x_{0n})^2+(y-y_{0n})^2}{w(z)^2}\right) \quad (2)$$

$$\varnothing_n(x.y.z) = \exp\left(-i\left(k\frac{(x-x_{0n})^2+(y-y_{0n})^2}{2R(z)} - \xi(z)\right)\right) \quad (3)$$

که (x_{0n}, y_{0n}) مکان قرار گیری مرکز پروفایل باریکه گاوسی nام در دهانه تابش است.

همچنین به منظور بررسی کیفیت باریکه ترکیبی و نیز میزان توان جایگزیده ناشی از هر آرایش در محل صفحه مشاهده در میدان دور از پارامتر توان در سبد (PIB) استفاده شده است که به صورت رابطه زیر تعریف می شود[۸]:

$$P = \int_0^{2\pi}\int_0^{R_B} I(x.y.z)\, dA \quad (4)$$

که در این جا R_B شعاع سبد و I توزیع شدت باریکه در صفحه مشاهده است که به صورت زیر داده می شود:

$$I(x.y.z) = \left(\sum E_n(x.y.z)\right) \times \left(\sum E_n(x.y.z)\right)^* \quad (5)$$

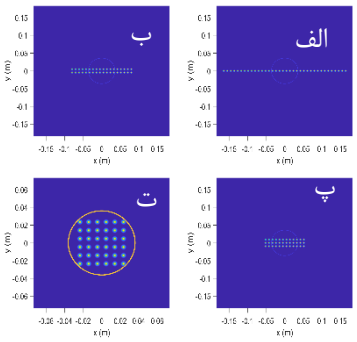
شبیه سازی و نتایج

همانطور که بیان شد، در ترکیب باریکه های لیزری به روش پهلو به پهلو، نحوه توزیع باریکه ها، فاصله بین آن ها و اندازه کمره هر باریکه در دهانه تابش (میدان نزدیک)، روی توزیع شدت و توان باریکه ترکیبی بسیار مؤثر است. دهانه تابش در واقع دایره ای است محیط بر آرایش هندسی که باریکه ها طبق آن آرایش چیده شده اند. به منظور بررسی تاثیر نحوه توزیع باریکه ها در دهانه تابش، ۳۶ باریکه لیزر فیبری ۱ کیلووات در آرایش های خطی، دو خط موازی، سه خط موازی و شش خط موازی شبیه سازی شده است. در شبیه سازی های انجام شده برای تمامی آرایش

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

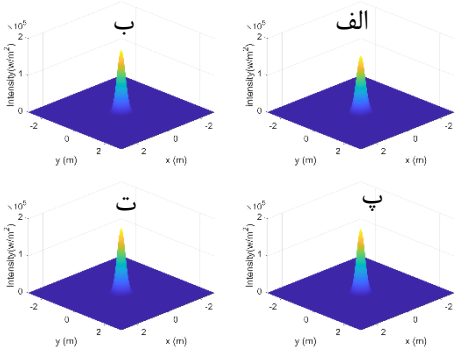
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

ها، اندازه کمره و نیز فاصله بین باریکه ها، یکسان در نظر گرفته شده است. توزیع شدت میدان نزدیک برای این آرایش ها در شکل (۱) نشان داده شده است. در اینجا فاصله مرکز تا مرکز باریکه ها ۲ برابر اندازه کمره باریکه ها فرض شده است. همچنین اندازه کمره هر باریکه۲,۴ میلی متر، در نظر گرفته شده است. همانطور که از شکل مشخص است، باریکه ها در دهانه تابش هیچ همپوشانی با یکدیگر ندارند، لذا در میدان نزدیک تداخل و ترکیبی وجود ندارد.



شکل ۱: توزیع شدت میدان نزدیک برای آرایش های الف: خطی، ب: دو خط موازی، پ: سه خط موازی، ت: شش خط موازی

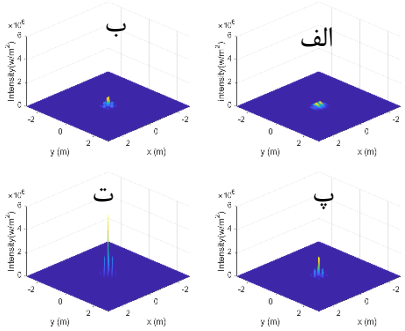
با استفاده از معادلات ارائه شده در بخش قبل، توزیع شدت میدان دور برای دو حالت ترکیب همدوس و ناهمدوس برای فاصله ۲,۵ کیلومتری صفحه مشاهده از دهانه تابش و برای هر چهار آرایش شبیه سازی شده است. در شکل ۲ توزیع شدت میدان دور برای ترکیب ناهمدوس برای این چهار آرایش ارائه شده است.



شکل ۲: توزیع شدت میدان دور برای ترکیب ناهمدوس آرایش های الف: خطی، ب: دو خط موازی، پ: سه خط موازی، ت: شش خط موازی

همانطور که شکل ۲ نشان می دهد، توزیع شدت برای آرایش های خطی، دو خط موازی، سه خط موازی و شش خط موازی، به ترتیب شکل های (الف-ت) به صورت یک باریکه گاوسی می باشد. پهنای توزیع شدت برای این آرایش ها به ترتیب برابر ۴۹، ۴۵، ۴۲ و ۳۷ سانتیمتر می باشد. نتایج نشان می دهد که با ثابت در نظر گرفتن اندازه کمره باریکه ها و نیز فاصله بین آن ها، با تغییر نحوه توزیع باریکه ها در دهانه تابش، پهنای توزیع شدت میدان دور، کاهش می یابد. در واقع، هرچه نحوه توزیع باریکه ها در دهانه تابش به گونه ای باشد که باریکه ها بخش بیشتری از دهانه تابش را پوشانده باشند، پهنای توزیع شدت باریکه ترکیبی کاهش می یابد، اما اندازه قله شدت برای کلیه آرایش ها در ترکیب ناهمدوس، تقریبا دارای مقدار مشابهی است و این طبیعی است زیرا با انتشار باریکه های غیر همدوس تا فاصله ۲,۵ کیلومتری، فقط برهمنهی بین میدان باریکه ها وجود دارد و لذا قله شدتی مشابهی خواهند داشت.

شکل (۳) توزیع شدت میدان دور برای ترکیب همدوس این چهار آرایش را نشان می دهد. رفتار نمودارها برای این حالت، مشابه ترکیب ناهمدوس می باشد یعنی، برای آرایش های خطی، دو، سه و شش خط موازی (شکل های الف-ت) پهنای توزیع شدت رو به کاهش است اما برخلاف ترکیب ناهمدوس در این حالت قله شدتی رو به افزایش است. به گونه ای که در ترکیب همدوس قله شدتی دو مرتبه بزرگتر از ترکیب نا همدوس است. همچنین، توزیع شدت باریکه نهایی دارای یک قله مرکزی بلند و چندین قله کوچکتر کناری می باشد. این قله ها ناشی از تداخل سازنده باریکه ها و فضای خالی اطراف قله مرکزی نیز ناشی از تداخل ویرانگر آن هاست. همچنین برای آرایش شش خط موازی باریکه نهایی دارای تقارن ۹۰ درجه محوری است، بدین معنی که اگر ۹۰ درجه توزیع شدت حول محور انتشار(Z) چرخانده شود، توزیع شدت مجددا تکرار می شود. اما سایر آرایش ها دارای تکرار پذیری ۱۸۰ درجه محوری می باشند. علت این امر نیز به نحوه چینش باریکه ها در دهانه تابش بر می گردد زیرا آرایش شش خط موازی به صورت مربع می باشد که دارای تقارن ۹۰ درجه محوری می باشد اما سایر آرایش ها مستطیل شکل هستند که داری تقارن ۱۸۰ درجه است. بنابراین تاثیر تقارن در چینش باریکه ها در دهانه تابش، به وضوح بر باریکه نهایی حاصل از ترکیب مشخص است.

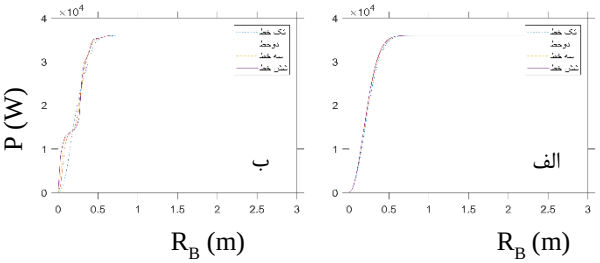


شکل ۳: توزیع شدت میدان دور برای ترکیب همدوس آرایش های الف: خطی، ب: دو خط موازی، پ: سه خط موازی، ت: شش خط موازی

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

در ادامه به منظور بررسی تاثیر نحوه توزیع باریکه ها در دهانه تابش، بر میزان توان در سبد، تغییرات توان باریکه ترکیبی بر حسب تغییرات شعاع سبد برای آرایش های خطی، دو، سه و شش خط موازی و برای دو حالت همدوس و ناهمدوس در قسمت های (الف و ب) شکل (۳) رسم شده است.



شکل۴: تغییرات توان بر حسب شعاع سبد برای آرایش های خطی، دوخط موازی، سه خط موازی و شش خط موازی برای الف: ترکیب نا همدوس، ب: ترکیب همدوس

در نمودارهای مربوط به حالت ناهمدوس (الف) مقدار توان با افزایش شعاع سبد به صورت یکنواخت افزایش می یابد تا نهایتا به یک مقدار ثابت میل کنند، اما در نمودارهای مربوط به حالت همدوس (ب) با افزایش شعاع سبد، ابتدا یک افزایش توان با شیب زیاد ناشی از قله مرکزی، در ادامه ثابت ماندن توان به علت ناحیه تهی از توان و مجدداً افزایش توان ناشی از قله های کناری مشاهده می شود. نکته مهم این است که شروع ناحیه تخت و ناحیه افزایش مجدد توان درآرایش شش خط موازی در شعاع کمتری نسبت به سایر نمودار ها رخ می دهد و این نشان دهنده توزیع شدت با پهنای کمتر در آرایش شش خط موازی در مقایسه با سایر آرایش ها است. همچنین مقدار توان در سبد در نمودارهای فوق به ازای سه شعاع سبد ۵، ۱۰ و ۲۰ سانتیمتر در جدول زیر خلاصه شده است.

جدول ۱: مقدار توان در سبد برای سه شعاع سبد و برای آرایش های خطی، دو، سه و شش خط موازی

آرایش هندسی	PIB (w) R_B= ۵ cm	PIB (w) R_B= ۱۰ cm	PIB (w) R_B= ۲۰ cm
خطی	۱۱۷۴	۴۵۱۶	۹۶۲۰
دو خط موازی	۴۶۳۱	۱۱۸۹۶	۱۳۴۴۷
سه خط موازی	۸۷۷۳	۱۲۶۳۹	۱۴۱۲۵
شش خط موازی	۱۰۷۸۶	۱۲۹۴۷	۱۴۳۶۳

همانطور که نتایج نشان می دهد، با تغییر نحوه توزیع باریکه ها یا به بیان دیگر تغییر نوع چینش باریکه ها در دهانه تابش ، مقدار توان در سبد تغییر می نماید به گونه ای که هرچه شکل چینش باریکه ها به سمت مربع نزدیک تر می شود، مقدار توان در سبد نیز بیشتر می گردد.

نتیجه‌گیری

آرایش هندسی و نحوه چینش باریکه ها در دهانه تابش، به عنوان یکی از مهمترین فاکتورها در دست یابی به باریکه ترکیبی با توان و کیفیت بالا محسوب می شود. از جمله مهمترین پارامترها در نحوه چینش هندسی باریکه ها در میدان نزدیک، تاثیر اندازه کمره باریکه ها، فاصله بین آن ها و نیز مکان قرار گیری هر باریکه در دهانه تابش است. با بکارگیری باریکه ها در آرایش پهلو به پهلو ی تک خط، دو خط موازی، سه خط موازی و شش خط موازی در دهانه تابش با اندازه کمره ثابت و نیز فاصله یکسان بین باریکه ها، تاثیر نحوه توزیع باریکه ها در میدان نزدیک بر ترکیب همدوس و ناهمدوس باریکه ها، بررسی شده است. برای این منظور توزیع شدت میدان نزدیک و دور برای هر آرایش ارائه شده تا بتوان با بررسی پهنای توزیع شدت، مقایسه ای بین آرایش های مختلف ارائه نمود. همچنین با ارائه نمودار توان در سبد، مقدار توان جایگزیده در مرکز صفحه مشاهده در میدان دور برای تمامی آرایش ها بررسی شده است. نتایج حاصل نشان می دهد که با تغییر چینش باریکه ها به سمت شکل مربع، که در آن توزیع باریکه ها به گونه ای است که سطح بیشتری از دهانه تابش پوشانده شده است، مقدار توان در سبد افزایش و نیز پهنای توزیع شده کاهش می یابد. همچنین نتایج نشان می دهد که پروفایل باریکه ترکیبی نهایی دارای همان تقارنی است که باریکه ها در دهانه تابش طبق آن چیده شده اند.

مرجع‌ها

[1] S. Kobayashi and T. Kimura, "Injection locking characteristics of an algaas semi-conductor laser," IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 16, no. 9, pp. 915–917,1980.

[2] J. M. Stuart, *et al.*, "100-kw coherently combined nd:Yag mopa laser array," *Frontiers in Optics 2009/Laser Science XXV*, 2009.

[3] Z. Liu, et al "Coherent beam combining of high power fiber lasers: Progress and prospect," Science China Technological Sciences, vol. 56, no. 7, pp. 1597–1606, 2013.

[4] N. R. Van et al "Comparison of coherent and incoherent laser beam combination for tactical engagements," Optical Engineering, vol. 51, no. 10, pp. 104301–104301,2012.

[5] Y. Li, et al, "Coherent and incoherent combining of fiber array with hexagonal ring distribution," Optics & Laser Technology, vol. 39, no. 5, pp. 957–963, 2007

[6] X. Fan, et al, "Coherent combining of a seven-element hexagonal fiber array," Optics & Laser Technology, vol. 42, no. 2, pp. 274–279, 2010.

[7] Jan K. et al .Effect of beam profile and partial coherence on coherent beam combining performance Optics Communications 442 (2019) 40–45.

[8] A. E. Siegman, "*How to (maybe) measure laser beam quality*," in Diode Pumped Solid State Lasers: Applications and Issues, p. MQ1, Optical Society of America,1998

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]