



کد مقاله : ۳-۲۳۳۲-۱۰-A

بررسی نحوه اثر گذاری پارامترهای کلیدی دهانه تابش با آرایش مربعی بر توزیع شدت و توان در سبد در ترکیب همدوس 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-بررسی پارامترهای تاثیر گذار در دهانه تابش امکان دستیابی به باریکه ترکیبی با توان و کیفیت بالا را فراهم می نماید. از جمله مهمترین پارامترها در نحوه چینش هندسی باریکه ها در دهانه تابش، اندازه کمره، فاصله بین باریکه ها و فاکتور فضای خالی در دهانه تابش می باشد. در این پژوهش ترکیب ۳۶ باریکه لیزر فیبری در آرایش پهلو به پهلو با هندسه مربعی بررسی شده است. با در نظر گرفتن فاصله ۲.۵ کیلومتری صفحه مشاهده و با فرض ثابت بودن فاکتور فضای خالی، تاثیر اندازه کمره در دهانه تابش بر توزیع شدت و توان در سبد در صفحه مشاهده بررسی شده است. با افزایش چهار برابری کمره باریکه ها مقدار توان در سبد/پهنای توزیع شدت، بیش از دو مرتبه افزایش / کاهش می یابد. همچنین تاثیر اندازه کمره روی توزیع شدت و توان در سبد، به ازای مقادیر مختلف فاکتور فضای خالی ۱، ۲، ۳ و ۴ نیز شبیه سازی و مشخص شد که به ازای فاکتور فضای خالی ۱، اندازه قله شدتی یک مرتبه افزایش و پهنای توزیع شدت ۲ مرتبه کاهش را نسبت به فاکتور فضای خالی ۴ نشان می دهد.

کلید واژه- آرایش مربعی، ترکیب باریکه ها، توان در سبد، توزیع شدت، فاکتور فضای خالی، کمره باریکه، واگرایی

Investigating the effect of key parameters of array aperture with square arrangement on the intensity distribution and power in the bucket, incoherent laser beam combination

Naser Siahvashi, Moslem Hamdami, Atoosa Sadat Arabanian, Reza Massudi*
Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

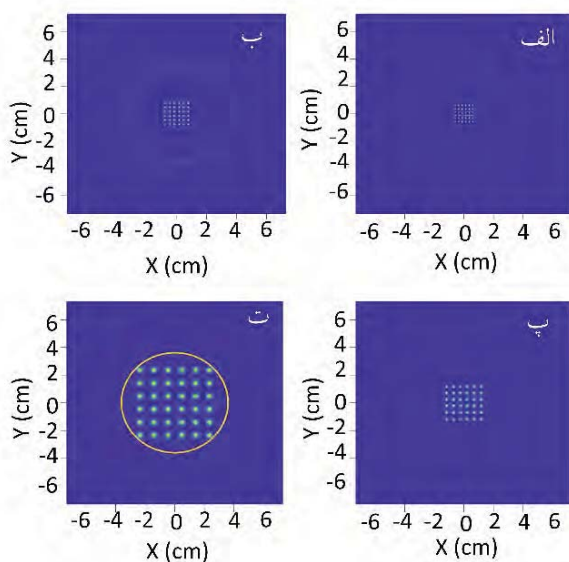
Abstract- Investigating effective parameters in the array aperture provides the possibility of achieving a combined beam with high quality and power. The beam waist, the distance between beams in the array aperture, and the vacancy factor are the most important parameters in the geometric arrangement of beams. In this study, a combination of 36 fiber laser beams in a side-by-side arrangement with square geometry is investigated. Considering the location of the observation plane at 2.5 km distance and assuming a constant value for vacancy factor in array aperture, the effect of beams waist sizes in array aperture on far-field intensity distribution and power in the bucket has been investigated. By four times increasing the beam waist, the amount of power in the bucket/intensity distribution width increases/decreases more than two orders of magnitude. Besides, by simulating the intensity distribution and power in the bucket, the effect of beam waist with different vacancy factor values, i.e. 1, 2, 3, and 4, it was found the peak intensity increases an order of magnitude and the intensity distribution width is reduced 2 times for vacancy factor of 1 compared to vacancy factor of 4.

Keywords: square arrangement, beam combining, power in bucket, Intensity distribution, vacancy factor, beam waist, beam divergence

$$V = \frac{x-2w_0}{2w_0} \quad (۴)$$

شبیه سازی و نتایج

به منظور بررسی تاثیر اندازه کمره باریکه ها در دهانه تابش، در حالت اول، ۳۶ باریکه لیزر ۱ کیلووات در چهار آرایش مربعیبا فرض ثابت بودن فاکتور فضای خالی (V) شبیه سازی شده است. توزیع شدت میدان نزدیک در دهانه تابش در شکل (۱) نشان داده شده است. در اینجا فاصله مرکز تا مرکز باریکه ها ۲ برابر اندازه کمره باریکه ها (V=1) فرض شده است. همچنین در آرایش های (الف-ت) اندازه کمره باریکه ها به ترتیب ۰.۶، ۰.۸، ۱.۰ و ۱.۲ میلیمتر می باشد. مطابق شکل، باریکه ها در دهانه تابش هیچ همپوشانی و تداخلی ندارند.



شکل ۱: توزیع شدت میدان نزدیک برای آرایش مربعی با اندازه کمره الف: ۰.۶؛ ب: ۰.۸؛ پ: ۱.۰؛ ت: ۱.۲ میلیمتر

شکل (۲) توزیع شدت حاصل از ترکیب برای این چهار آرایش رادر فاصله ۲.۵ کیلومتری نشان می دهد. توزیع شدت باریکه ترکیبی دارای یک قله مرکزی بلند و تعدادی 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 ها است. برای آرایش با اندازه کمره های ۰.۶، ۰.۸ و ۱.۰ و ۱.۲ میلیمتر (شکل های الف-ت) پهنای توزیع شدت رو به کاهش و قله شدتی رو به افزایش است. مقایسه توزیع شدت ها نشان می دهد که اندازه قله شدت و پهنای آن در آرایش شکل ت به ترتیب حداقل یک مرتبه بزرگتر و دو مرتبه کوچکتر از شکل الف است.

در ادامه، تغییرات توان باریکه ترکیبی بر حسب تغییرات شعاع سید برای آرایش ها با اندازه کمره های ۰.۶ و ۰.۸ و ۱.۰ و ۱.۲ میلیمتر در شکل (۳) رسم شده است.

امروزه استفاده از لیزرهای توان بالا در صنایع گوناگون مشهود است و لیزرهای فیبری به دلیل ویژگی های منحصر به فرد نسبت به سایر لیزرها بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند [۱]. از آنجا که افزایش توان در این نوع لیزرها، به دلیل ظهور اثرات گرمایی و غیر خطی با مشکل مواجه شده است، ترکیب باریکه های لیزری به منظور دستیابی به توان بالا و نیز غلبه بر این محدودیت ها مورد استفاده قرار گرفته است [۲-۴]. روش های متعددی برای دستیابی به باریکه ترکیبی با توان و کیفیت بالا انجام شده است که در این میان، نحوه چینش باریکه ها یکی از مهمترین فاکتورها برای رسیدن به این هدف می باشد [۵]. هوو کانگ و همکارانش به بررسی اثرات نوع آرایش در افزایش توان در سید پرداخته و آرایش های متفاوتی را بکار گرفتند [۶]. جان کی و همکارانش به بررسی اثر نوع پروفایل روی عملکرد ترکیب پهلوی به پهلوی باریکه های لیزری پرداخته اند [۷]. از جمله پارامترهای مهم در چینش باریکه ها در دهانه تابش، نوع آرایش، فاصله بین باریکه ها، اندازه کمره و فاکتور فضای خالی می باشد. در این مقاله تاثیر اندازه کمره باریکه در دهانه تابش، بر ترکیب همدوس باریکه ها با هندسه مربعی بررسی شده است. بررسی ها برای دو حالت مختلف مقادیر یکسان و متفاوت فاکتور فضای خالی در دهانه انجام شده است. برای این منظور توزیع شدت در دهانه تابش و صفحه مشاهده ارائه شده تا بتوان با بررسی پهنای توزیع شدت، مقایسه ای بین آرایش های مختلف ارائه نمود. همچنین با ارائه نمودار توان در سید، مقدار توان در محل هدف بررسی شده است.

اصول و تئوری

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

$$E_n(x,y,z) = A_n(x,y,z) \times \exp[-ikz + iA_n(x,y,z)] \quad (۱)$$

که $A_n(r)$ توزیع دامنه و $\phi_n(r)$ توزیع فاز مربوط به هر باریکه است. توزیع شدت باریکه ترکیبی به صورت زیر داده می شود:

$$I(x,y,z) = \sum E_n(x,y,z) \sum E_n(x,y,z)^* \quad (۲)$$

برای بررسی کیفیت و توان باریکه ترکیبی از پارامتر توان در سید (PIB) که به صورت رابطه (۳) است استفاده می شود [۸]:

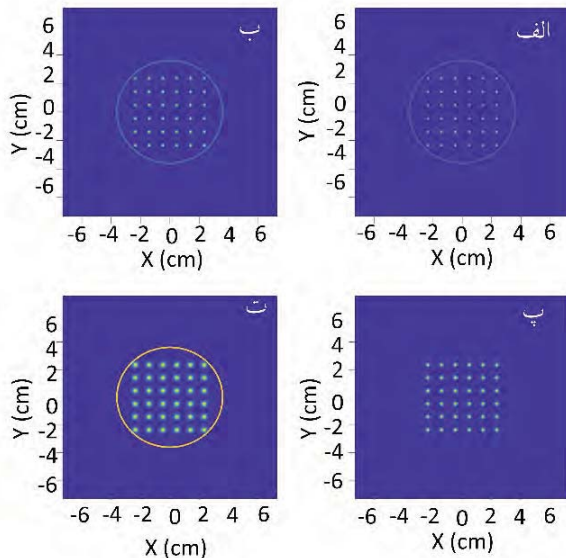
$$P = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_B} I(x,y,z) dA \quad (۳)$$

در اینجا R_B شعاع سید و I توزیع شدت در محل هدف است. فاکتور فضای خالی توسط رابطه (۴) محاسبه می گردد [۹]، که w_0 کمره هر باریکه و X کمترین فاصله بین باریکه ها است.

جدول ۱: مقدار توان در سید برای سه شعاع سید و برای آرایش با اندازه کمره ۰.۶، ۰.۸ و ۱.۲ و ۲.۴ میلیمتر

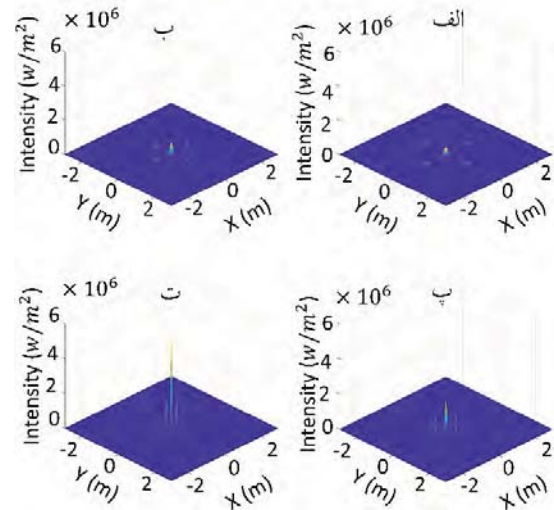
اندازه کمره (mm)	PIB (w) $R_B = 20$ cm	PIB (w)cm $R_B = 10$	PIB (w) $R_B = 5$ cm
۰.۶	۱۱۶۵۸	۷۹۷۷	۲۷۹۲
۰.۸	۱۲۰۸۱	۱۰۳۳۱	۴۴۷۴
۱.۲	۱۳۰۶۹	۱۱۶۰۳	۷۹۹۲
۲.۴	۱۴۳۶۳	۱۲۹۴۷	۱۰۷۸۶

در حالت دوم، به بررسی تاثیر کمره باریکه با متفاوت در نظر گرفتن مقدار فاکتور فضای خالی پرداخته میشود. شکل ۴ توزیع شدت میدان نزدیک آرایش مربعی با اندازه دهانه تابشی ۷.۳ cm و مقادیر فاکتور فضای خالی الف: ۱، ب: ۲، ج: ۳، د: ۴ را نشان می دهد. در آرایش های (الف-ت) اندازه کمره باریکه ها به ترتیب ۲.۴ و ۱.۶ و ۱.۲ و ۰.۹ می باشد. همانطور که از شکل مشخص است، باریکه ها در دهانه تابش هیچ همپوشانی و تداخلی با یکدیگر ندارند.

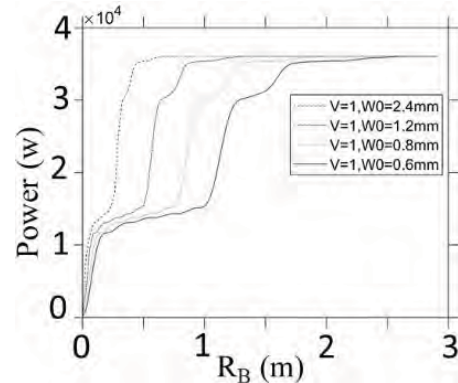


شکل ۴: توزیع شدت میدان نزدیک برای آرایش مربعی با مقدار فاکتور فضای خالی الف: ۱، ب: ۲، ج: ۳، د: ۴

شکل (۵) توزیع شدت این چهار آرایش را نشان می دهد. بطوریکه در اینجا نیز باریکه ترکیبی دارای یک قله مرکزی بلند و تعدادی قله کوچکتر کناری می باشد. مقایسه توزیع شدت ها با فاکتورهای فضای خالی ۱، ۲، ۳، ۴ و ۱ به ترتیب در شکل های (الف-ت) نشان می دهد که پهنای توزیع شدت رو به کاهش و قله شدتی رو به افزایش است. اندازه قله شدت و پهنای آن در توزیع شدت مربوط به فاکتور فضای خالی ۱ به ترتیب حداقل یک مرتبه بزرگتر و دو مرتبه کوچکتر از فاکتور فضای خالی ۴ می باشد. همچنین برای فاکتور فضای خالی بزرگتر، توزیع شدت دارای قله های شدتی بیشتری حول قله مرکزی است.



شکل ۲: توزیع شدت میدان دور برای ترکیب همدوس آرایش های مربعی با اندازه کمره الف: ۰.۶، ب: ۰.۸، ج: ۱.۲، د: ۲.۴ میلیمتر



شکل ۳: تغییرات توان بر حسب شعاع سید برای آرایش مربعی با اندازه کمره ۰.۶ و ۰.۸ و ۱.۲ و ۲.۴ میلیمتر

با توجه به شکل، با افزایش شعاع سید ابتدا یک افزایش توان با شیب زیاد ناشی از قله مرکزی، سپس ثابت ماندن توان به علت ناحیه تهی از توان و مجدداً افزایش توان ناشی از قله های کناری مشاهده می شود. شروع ناحیه تخت و ناحیه افزایش مجدد توان (حالت پله در شکل) برای نمودار خط چین، در شعاع بسیار کمتری نسبت به سایر نمودار ها رخ می دهد و این بیانگر توزیع شدت با پهنای کمتر در آرایش با کمره ۲.۴ میلیمتر در مقایسه با سایر آرایش ها است. مقدار توان در سید به ازای سه شعاع سید ۵، ۱۰ و ۲۰ سانتیمتر در جدول ۱ آمده است. همانطور که نتایج نشان میدهد، برای آرایش مربعی با مقدار ثابت فاکتور فضای خالی، با افزایش اندازه کمره، مقدار توان در سید نیز افزایش می یابد، به گونه ای که برای کمره ۲.۴ میلیمتر مقدار توان در سید برای شعاع سید ۵ سانتیمتر یک مرتبه بزرگتر از اندازه کمره ۰.۶ میلیمتر است.

جدول ۲: مقدار توان در سید برای سه شعاع سید و برای آرایش مربعی

با مقادیر فاکتور فضای خالی ۱،۲،۳،۴

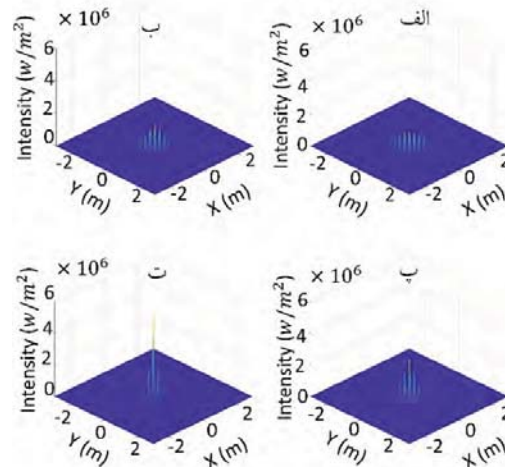
آرایش هندسی	PIB (w) $R_B = 20 \text{ cm}$	PIB (w)cm $R_B = 10$	PIB (w) $R_B = 5 \text{ cm}$
V=1	14363	12947	10786
V=2	6561	5805	4816
V=3	3730	3276	2713
V=4	2400	2099	1737

نتیجه گیری

در ترکیب همدوس باریکه ها، تاثیر اندازه کمره باریکه، فاصله بین باریکه ها و نیز فاکتور فضای خالی از مهمترین پارامترها در نحوه چینش هندسی باریکه ها در دهانه تابش می باشد. با فرض ثابت بودن فاکتور فضای خالی، برای آرایش مربعی، تاثیر اندازه کمره ها بر توزیع شدت و توان در سید بررسی و نتایج نشان داد که با افزایش کمره باریکه ها مقدار توان در سید افزایش و نیز پهنای توزیع شده کاهش می یابد. همچنین با بررسی مقادیر فاکتور فضای خالی مختلف، مشخص شد که هرچه مقدار فاکتور فضای خالی کم تر باشد، اندازه قله شدت افزایش و پهنای توزیع شدت کاهش می یابد. مقایسه نمودار توان در سید، نشان می دهد که، با کاهش مقدار فاکتور فضای خالی، مقدار توان در سید افزایش و با افزایش فاکتور فضای خالی، توزیع شدت دارای قله های کناری بیشتری حول قله مرکزی بوده که این قله ها در نمودار توان در سید به صورت پله های متوالی نمایان می گردد.

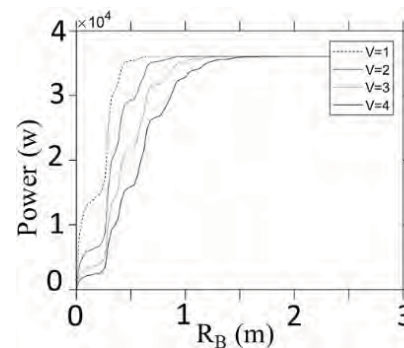
مرجع ها

- [1] Augst SJ, Fan TY, Antonio S. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers. *Opt Lett* 2004;29,474-6.s
- [2] J. M. Stuart, et al., "100-kw coherently combined nd:Yag mopa laser array," *Frontiers in Optics/Laser Science*, 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] سیاهوشی، همدمی، عربانیان و مسعودی، "تاثیر نحوه توزیع باریکه ها در میدان نزدیک بر توزیع شدت و توان در سید در میدان دور در ترکیب همدوس و ناهمدوس باریکه های لیزری" کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، ۲۶، ۷۲۸-۷۲۵، ۱۳۹۸
- [6] L. Hou-Kang, et al., "The improved power of the central lobe in the beam combination and high power output," *Chinese Physics Letters*, vol. 29, no. 4, p. 044204, 2012
- [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 measure laser beam quality," in *Diode Pumped Solid State Lasers: Applications and Issues*, p. MQ1, Optical Society of America, 1998
- [9] P. Zhou, Z. et al, "Numerical analysis of the effects of aberrations on coherently combined fiber laser beams," *Applied optics*, vol. 47, no. 18, pp. 3350-3359, 2008.



شکل ۵: توزیع شدت میدان دور برای ترکیب همدوس آرایش مربعی با مقدار فاکتور فضای خالی الف: ۴، ب: ۳، پ: ۲، ت: ۱

شکل (۶) تغییرات توان باریکه ترکیبی بر حسب تغییرات شعاع سید برای آرایش مربعی با مقادیر فاکتور فضای خالی ۱، ۲، ۳، ۴ را نشان می دهد.



شکل ۶: تغییرات توان بر حسب شعاع سید برای آرایش مربعی با مقادیر فاکتور فضای خالی ۱، ۲، ۳، ۴

رفتار نمودارها در این شکل مشابه شکل ۳ می باشد. حالت پله ای برای نمودار با فاکتور فضای خالی ۱ تنها یک بار اتفاق می افتد و هرچه مقدار فاکتور فضای خالی بیشتر می شود، تعداد پله ها نیز افزایش می یابد که بیانگر قله های کناری واقع در شعاع های مختلف در توزیع شدت صفحه مشاهده است. همچنین شروع ناحیه تخت و ناحیه افزایش مجدد توان برای فاکتور فضای خالی ۱، در شعاع بسیار کمتری نسبت به سایر نمودارها رخ می دهد و این بیانگر توزیع شدت قله مرکزی با پهنای کمتر در این آرایش نسبت به سایر آرایش ها است. مقدار توان در سید به ازای سه شعاع سید ۵، ۱۰ و ۲۰ سانتیمتر در جدول ۲ آمده است. همانطور که از جدول ۲ مشخص است، هرچه فاکتور فضای خالی بیشتر باشد، مقدار توان در سید کاهش می یابد.