



بررسی نظری و تجربی پارامترهای بهینه در طراحی کاواک های تک بیضی و بازتابنده جفتیده نزدیک

سید مهدی موسوی^۱ محمود سلطان الکتابی^۲، محمد حسن یوسفی^۱،

محسن رضانی^۱، سعید ناظم^۱، عبدالصمد طاهری^۱

^۱ دانشگاه صنعتی مالک اشتر-شاهین شهر، ^۲ گروه پژوهشی اپتیک کوانتومی دانشگاه اصفهان

چکیده- ابتدا میزان بازده نظری کاواک تک بیضی و همچنین کاواک بازتابنده جفتیده نزدیک در یک لیزر حالت جامد را بررسی و تأثیر پارامترهای مختلف بر میزان انرژی ارزیابی می شوند. آنگاه به صورت تجربی هر دو کاواک لیزری را برپا و نمودار انرژی خروجی بر حسب انرژی دمشی، تأثیر آهنگ تکرار لیزر بر میزان انرژی خروجی و افت بازده لیزر را بدست آورده و سپس با نتایج نظری مقایسه شده اند. سر انجام نمایه خروجی لیزر دو کاواک تحت انرژی دمشی یکسان با یکدیگر مقایسه شده اند.

کلید واژه- انرژی انتقال لیزر، بازتابنده جفتیده نزدیک، تک بیضی، کاواک

کد PACS - ۵۵۶۰ . ۱۴۰

این مقاله قصد داریم میزان بازدهی، مزایا و معایب استفاده از کاواک های تک بیضی و بازتابنده سرامیکی را بررسی کنیم. در این بررسی ها فرض می شود، نور تابشی همسانگرد بوده و از قانون لامبرت تبعیت می کند. همچنین پرتوهایی که پس از بازتاب از جداره کاواک وارد لامپ می شوند، در محیط پلاسمای لامپ جذب شوند.

۲- بررسی نظری

در ابتدا بازدهی انتقال انرژی از لامپ به میله لیزر را در کاواک های بیضی بررسی می کنیم. همانگونه که در شکل (۱) مشاهده می شود، a و b به ترتیب قطر بزرگ و کوچک بیضی، C قطر لامپ درخش، d قطر میله لیزری، r و s به ترتیب فاصله محور میله لیزری و محور لامپ از نقطه دلخواه P بر روی سطح بیضی و e ضریب خروج از مرکز بیضی است با توجه به فاصله میله لیزری از نقطه P می توان اندازه تصویر لامپ را در محل میله مشخص نمود. در این صورت تصویر لامپ در مکان میله برابر $r \frac{d}{s}$ بوده و لذا میزان

۱- مقدمه

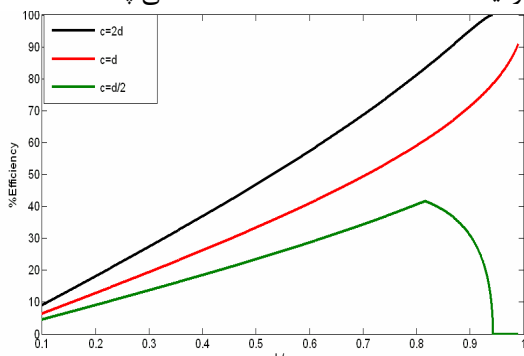
یکی از پارامترهای اساسی در طراحی لیزرهای حالت جامد، طراحی کاواک لیزری با بازده انتقال انرژی بالا، ابعاد مناسب و انتقال حرارت بالا است. بازده لیزر به صورت نسبت تبدیل انرژی الکتریکی داده شده به لامپ، به انرژی خروجی لیزر تعریف می شود.

$$\eta = \eta_p \eta_T \eta_a \eta_s \eta_E \eta_B \eta_Q \quad (1)$$

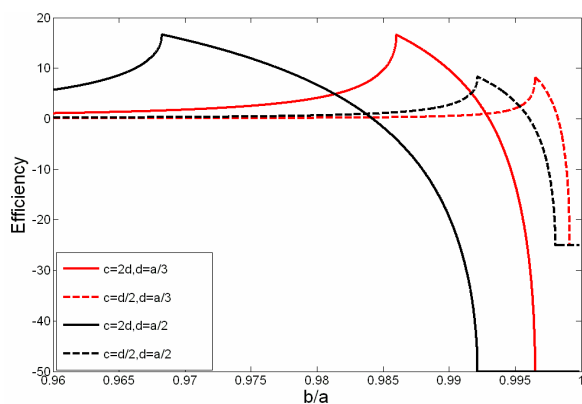
η_p بازده تبدیل انرژی الکتریکی به تابشی در طول موج جذبی میله لیزر، η_T بازده انتقال انرژی از لامپ به میله لیزر، η_a بازده جذب در میله لیزر، η_Q بازده کوانتومی، η_s بازده استوکس، η_E بازده استخراجی، η_B بازده همپوشانی پرتو است. مهمترین فاکتور در طراحی یک کاواک بازده انتقال انرژی بالا از لامپ به میله لیزری است (η_T). چندین روش برای محاسبه η_T وجود دارد. که مهمترین آنها روش مونت کارلو و میله های تصویری (RI) است. [۱ و ۲].

مرسوم ترین کاواکهایی که در لیزرهای حالت جامد مورد استفاده قرار می گیرند، کاواکهای بیضی، کاواکهای بازتابنده پخشی (DCC) و بازتابنده جفتیده نزدیک (RCC) هستند. در

ناحیه جذب در میله نیز کاهش می یابد شکل (۳). در نمودار شکل (۳) تاثیر اندازه های شعاع لامپ و میله $(\frac{100}{\pi}[\alpha_1 - \frac{c}{d}\theta_1])$ بر بازده انتقال انرژی را بررسی کرده ایم. همانطوری که دیده می شود با افزایش نسبت d/c و d/a بازده کاهش می یابد (ارقام منفی نشان دهنده این است که اتلاف جمله ناشی از قطر لامپ بیشتر از تقویت جمله ناشی از قطر میله لیزر است). اکنون به بررسی کاواک بازتابیده جفتیده نزدیک می پردازیم

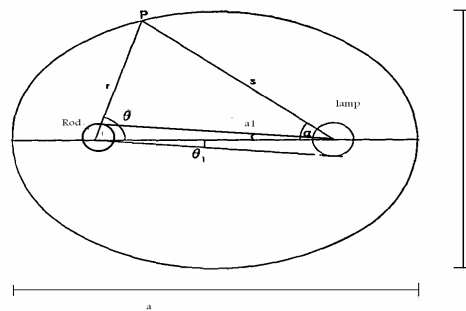


شکل ۲: نمایشی از بازدهی انتقال یک کاواک تک بیضی بر حسب نسبت b/a



شکل ۳: نمایشی از میزان تاثیر اندازه شعاعهای لامپ و میله بر بازدهی انتقال

. کاواک بازتابیده جفتیده نزدیک قطعه سرامیکی است که معمولاً جنس آن اکسید آلومینیوم با بازتابندگی 0.997 در طول موج 808 نانومتر است. از این رو آن را اغلب کاواک سرامیکی می نامند. این کاواک دارای مزایای زیادی از جمله قدرت تحمل تنش بالا، بازتابندگی بالا در طول موج های مختلف، قابلیت هدایت گرمایی بالا، پایداری الکتریکی و شیمیایی بالا می باشد. اما مهمترین خصوصیت بارز آنها غیر حساس بودن به جابجایی و چرخش کوچک کاواک نسبت به



شکل ۴: سطح مقطع یک کاواک بیضوی

انرژی انتقالی برابر $\frac{c}{d} \frac{s}{r}$ خواهد شد. (بازتابندگی جداره کاواک 100% فرض شده است). dE انرژی است که تحت زاویه $d\alpha$ به میله می رسد. چنانچه کل انرژی را در بازه $0 < \theta < \pi$ در نظر بگیریم، خواهیم داشت [۲]:

$$E = \frac{100}{\pi} \int_0^{\pi} \left(\frac{c}{d} \frac{s}{r}\right) d\alpha \quad (2)$$

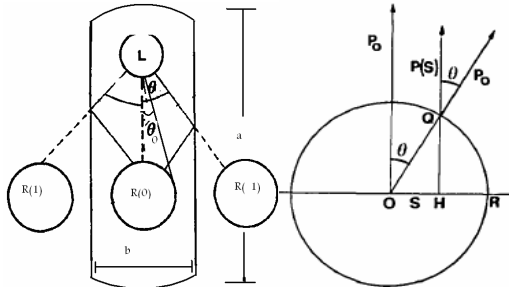
$$E = \frac{100}{\pi} [\alpha_0 + \frac{c}{d} \theta_0] \quad (3)$$

پرتوهایی که از لامپ درخش خارج می شوند و بدون بازتاب به میله می رسند، در بازه $0 < \theta < \alpha$ قرار دارند. در رابطه بالا از برخورد بدون بازتاب پرتو به میله و اتلاف ناشی از بازگشت پرتو به لامپ چشم پوشی شده است. اگر کسر انرژی که بدون بازتاب از جداره کاواک به لامپ و میله میرسد را به ترتیب در بازه $0 < \theta < \theta_1$ و $0 < \alpha < \alpha_1$ در نظر بگیریم، می توان رابطه (۳) را به صورت زیر اصلاح نمود [۲ و ۴]:

$$E = \frac{100}{\pi} [\alpha_0 + \alpha_1 + \frac{c}{d} (\theta_0 - \theta_1)]$$

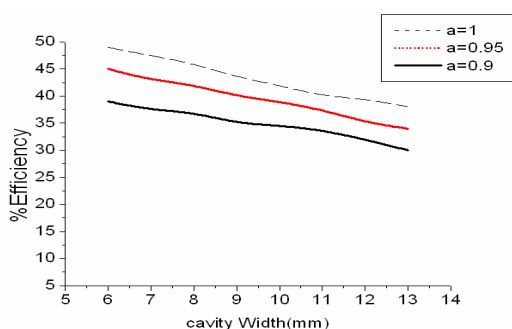
در شکل (۲) بازده انتقال انرژی برای سه کاواک مختلف (با نسبت میله به لامپ متفاوت) بر حسب b/a را نشان داده ایم. همانگونه که مشاهده می شود، با افزایش نسبت b/a بازده انتقال انرژی افزایش می یابد. از سوی دیگر بازده انتقال رابطه مستقیمی با نسبت c/d دارد. هنگامی که $c=d$ باشد، بازده انتقال وابستگی کمی به مقادیر c و d پیدا می کند و در حالت $b \cong c$ بیشترین بازدهی را داریم. درحالی که در حالت $c=d/2$ بعد از $b/a \cong 0.82$ کاهش می یابد. در واقع با کاهش نسبت c/d علاوه بر افزایش تلفات در لامپ، سطح

$$\int_{S_i}^{S_{i+1}} P(S) dS \quad \text{توان کل گسیل شده در زاویه } \theta_i \text{ است.}$$



شکل ۴: نمای عرضی از کاواک بازتابنده سرامیکی و نمایشی از روش RI

در این محاسبات از بازتاب پرتوها از سطح لامپ یا میله صرف نظر شده است. در کاواک های RCC، ضریب بازتاب (α) مستقل از زاویه برخورد پرتو با میله لیزر می باشد. با مقایسه نتایج نظری به دست آمده برای بازده انتقال (شکل ۵ و ۶) می توان دریافت که با افزایش طول و عرض کاواک، بازده انتقال انرژی کاهش می یابد. این موضوع نشان می دهد هر چه ابعاد کاواک کوچکتر باشد بازده انتقال انرژی بیشتر خواهد شد. همچنین بازده انتقال انرژی رابطه مستقیم با قطر میله لیزر دارد. همانطور که در نمودار شکل های ۵ و ۶ می توان مشاهده کرد، بازده انتقال انرژی رابطه مستقیمی با ضریب بازتاب از دیواره های کاواک دارد. به طوری که کاهش ۵ درصدی در ضریب بازتاب، موجب افت زیاد بازده انتقال انرژی می شود. علاوه بر آن هر چه ابعاد کاواک کوچک باشد میزان بازدهی بیشتر خواهد شد.



شکل ۵: نمودار تاثیر عرض کاواک بر میزان بازدهی برای سه نوع ضریب بازتاب

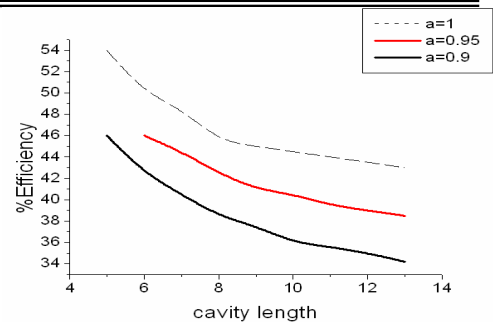
میله لیزری یا لامپ است. برخلاف کاواک های بیضوی که اکثر پرتو ها بعد از یک بار بازتاب به میله لیزر می رسند، در کاواک های بازتابنده سرامیکی (RCC) بازتابهای متعدد داریم. محاسبه بازدهی انتقال در این کاواک ها با استفاده از روش مونت کارلو بسیار پیچیده است. به این منظور از روش تصویر سازی میله لیزری (RI) استفاده می شود. چنانچه لامپ را همانند چشمه لامبرت در نظر بگیریم، در آن صورت توانی که تحت زاویه θ منتشر می شود برابر $P(S) = P_0 \cos \theta$ است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می شود. چنانچه پرتوها از لامپ طبق زاویه $\theta < \theta_0$ خارج شوند، بدون بازتاب با جداره کاواک به میله لیزر می رسند و اگر تحت زاویه ای بزرگتر خارج شوند، حداقل یک بازتاب خواهند داشت، چنانچه دو جدار کاواک را به عنوان آینه تختی در نظر بگیریم، می توان (همانند روش بارهای تصویری) بازتاب ها را نادیده گرفت و پرتو را در پشت جداره کاواک امتداد داد و در واقع تصویری از میله لیزری پشت جداره کاواک در راستای محور میله داشته باشیم. چنانچه پرتوها توسط N بازتاب به میله لیزر برسند، می توان N تصویر از میله را جایگزین بازتاب کنیم [۳]. مهمترین مزیت استفاده از روش RI این است که همه پرتوها را می توان در قالب مجموعه هایی در نظر گرفت که هر مجموعه در یک مسیر مشخص حرکت می کند. اگر مطابق شکل (۴) پرتو سطح لامپ را در زاویه θ ترک کنند، آن گاه شدت پرتو در راستای محور عرضی برابر است با:

$$P(S) = \frac{P_0 \sqrt{R^2 - S^2}}{R} \quad (۴)$$

از طرفی چون در مجموع N بازتاب داریم، پس N مجموعه می تواند زاویه 2π را به طور کامل بپوشاند. چنانچه شدت مجموعه ای که به میله لیزری می رسند و در راستای θ_i حرکت کنند برابر با $P(\theta_i) = \sum_i \alpha^i \int_{S_i}^{S_{i+1}} P(S) dS$ باشد α ضریب بازتاب از دیواره کاواک است) می توان بازدهی را به صورت زیر نوشت [۳]:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^N P(\theta_i)}{\frac{1}{R_L} \int_{-R_L}^{R_L} P(S) dS} \quad (۵)$$

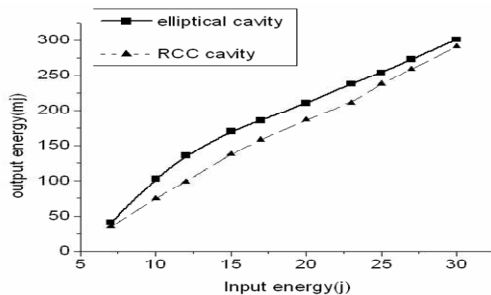
مشاهده می شود، بازده انتقال در کاواک تک بیضی بالاتر از کاواک بازتابنده سرامیکی است. در شکل (۷) انرژی خروجی لیزر را بر حسب انرژی الکتریکی ورودی برای هر دو کاواک نشان داده ایم. همانطوری که مشاهده می شود بازده کاواک بیضوی بیشتر از کاواک سرامیکی بازتابنده است، اما در انرژی های بالا هر دو نمودار به هم می رسند که این به دلیل هدایت گرمایی بالاتر کاواک های سرامیکی نسبت به کاواک های بیضوی است. همینطور اثرات عدسی گرمایی در این کاواک ها کمتر از کاواکهای بیضوی است. در شکل (۸ و ۹) قیاسی از میزان انرژی خروجی لیزر در حالت های تک هرتز و ۱۵ هرتز برای هر دو کاواک نشان داده شده است. به منظور بررسی اثرات اتلاف ناشی از عدسی گرمایی اجازه دادیم لیزر به مدت ۱۵ ثانیه با فرکانس ۱۵ هرتز کار کند، سپس انرژی متوسط خروجی از کاواک را در ثانیه پانزدهم اندازه گیری کرده و با انرژی خروجی در حالت تک فرکانس بررسی نمودیم. این آزمایش را برای هر دو کاواک در انرژی های دمشی مختلف تکرار کردیم. به منظور داشتن شرایط گرمایی یکسان و بازگشت میله لیزر به حالت اولیه فاصله زمانی بین هر آزمایش را ۱۰ دقیقه در نظر گرفتیم. همانگونه که در شکل (۸ و ۹) مشاهده می شود میزان کاهش انرژی در فرکانس ۱۵ هرتز در کاواک سرامیکی کمتر از کاواک تک بیضی بیضوی است. در ادامه پروفایل پرتو را در فرکانس یک هرتز با



شکل ۶: نمودار تاثیر طول کاواک بر میزان بازدهی برای سه نوع ضریب جذب

۳- نتایج تجربی:

در این قسمت به بررسی تجربی کاواک های تک بیضی و بازتابنده جفتیده نزدیک (بازتابنده سرامیکی) پرداخته و بازده کل لیزر را برای هر دو کاواک در انرژی های دمشی مختلف برای دو فرکانس (۱ و ۱۵ هرتز) بدست می آوریم. در پایان به مقایسه نتایج به دست آمده می پردازیم. در این آزمایش کاواک بیضوی از جنس برنج با پوشش طلا به ضخامت حدود ۲۰ میکرومتر و بازتابندگی ۹۵٪ برای تابش ۸۰۸ نانومتر می باشد. ابعاد این کاواک $a=30$ و $b=27$ میلیمتر است. از سوی دیگر کاواک سرامیکی از جنس اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) با بازتابندگی ۹۹٪ در طول موج ۸۰۸ نانومتر و ضریب هدایت گرمایی بالا در حدود $(7.9 \times 10^6 / C)$ می باشد و طولی برابر ۱۶ میلیمتر و عرض ۸ میلیمتر دارد. میله لیزری (۱/۱) Nd:YAG در ابعاد 80×4 میلیمتر و لامپ درخش از جنس زنون با قطر داخلی ۳ میلیمتر و قطر خارجی ۵ میلیمتر و طول آرک ۶۳ میلیمتر است. داخل هر دو کاواک مایع خنک کننده (آب خالص) جریان دارد زیرا ضریب شکست آب برای عبور نور لامپ در ۸۰۸ نانومتر شفاف می باشد. ولتاژ راه اندازی لامپ در حدود ۲۰ کیلو ولت است و پهنای پالس لیزر در حالت آزاد حدود ۸۰ میکروثانیه می باشد. مشدد تمام کاواک ها با یکدیگر یکسان و شامل دو آینه با فاصله جدایی ۲۱ سانتی متر، یکی آینه کاو به شعاع ۲۵۰۰ میلیمتر با بازتابندگی ۱۰٪ و دیگری آینه تخت با بازتابندگی ۱۶٪ می باشد. همانطوری که از محاسبات قسمت قبل می توان دید بازده انتقال در کاواک تک بیضی با نسبت b/a برابر ۰/۹ و $c/d=0/8$ برابر ۶۵ درصد و کاواک بازتابنده سرامیکی با نسبت b/a برابر ۰/۵ و $c/d=0/8$ برابر ۴۵٪ می باشد. که



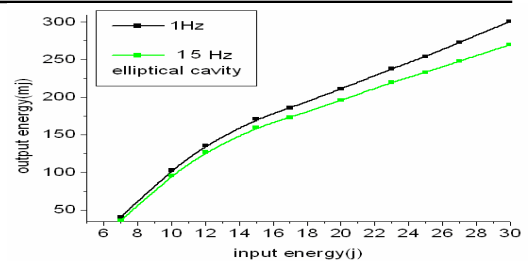
شکل ۷: نمودار انرژی ورودی بر حسب انرژی خروجی در کاواک تک بیضی و بازتابنده سرامیکی

انرژی دمشی ۱۵ ژول در هر دو کاواک ثبت نمودیم (شکل ۱۰ و ۱۱). مشاهده کردیم که پروفایل پرتو در کاواک سرامیکی به مد گوسی نزدیک است. در حالی که در کاواک بیضوی پروفایل پرتو از مد گوسی خارج شده است.

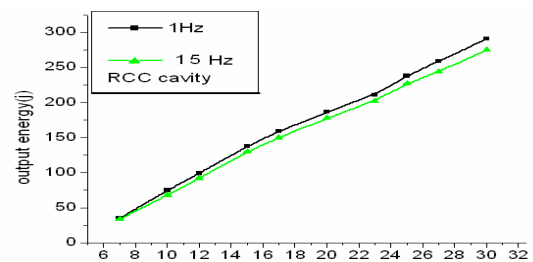
تک بیضی هر چه نسبت c/d بزرگتر باشد، بازده کاواک بیشتر خواهد بود. از سوی دیگر تقریباً بیشترین بازده در محدوده $0/9 \leq b/a \leq 1$ است. در کاواک بازتابنده سرامیکی هر چه ابعاد عرضی کاواک کوچکتر باشد بازده بالاتر می رود. با بررسی تجربی انرژی خروجی لیزر در دو کاواک یاد شده در فرکانس های ۱ و ۱۵ هرتز مشاهده نمودیم. در فرکانس تک هرتز، افت انرژی در کاواک تک بیضی بیشتر از کاواک سرامیکی است با وجود اینکه بازده انرژی کاواک تک بیضی بیشتر از کاواک سرامیکی است. در فرکانس های بالا به دلیل اثرات گرمایی بالا در کاواک تک بیضی نسبت به کاواک سرامیکی شکل پروفایل پرتو در کاواک سرامیکی بهتر از کاواک تک بیضی است. از این رو می توان گفت هر جایی بازدهی برای ما مهم باشد کاواک های بیضوی بر کاواک های سرامیکی ارجحیت دارند و هر جا شکل پرتو برای ما مهم باشد کاواک های سرامیکی ارجحیت دارند.

مراجع

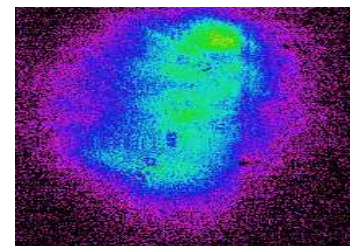
- [1] Koechner.W, *Solid-State Laser Engineering*, John Wiley, pp.355-405, New York, 1999.
- [2] C.Bowness, "On the Efficiency of single and Multiple Elliptical Laser Cavity", *Applied optics*, Vol.4, No.1, January, 1965
- [3] F.Docchio, "The rod image :a new method for the calculation of pump efficiency in reflecting close-coupled cavities", *Applied optics*, Vo.24, No.22, November, 1985
- [4] S.B.Schuldt, R.L.Aagard, "An Analysis of Radiation Transfer By Means of Elliptical Cylinder Reflectors", *Applied optics*, Vo.2, No.5, May, 1963



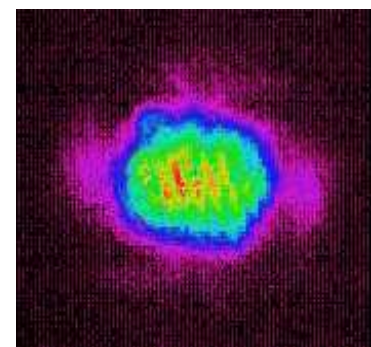
شکل ۸: نمایشی از کاهش انرژی در اثر بالا رفتن فرکانس در کاواک تک بیضی



شکل ۹: نمودار کاهش انرژی در اثر بالا رفتن فرکانس در کاواک RCC



شکل ۱۰: نمایشی پروفایل پرتو لیزر با کاواک بیضوی در انرژی ۱۵ ژول تک هرتز



شکل ۱۱: نمایش پروفایل پرتو لیزر با کاواک بازتابنده سرامیکی در انرژی ۱۵ ژول تک هرتز

۴- نتیجه گیری:

با بررسی بازده نظری دو کاواک ذکر شده دریافتیم در کاواک