

بررسی مدل تئوری کارآیی لیزر مادون قرمز دور اسید فرمیک در دو ساختار استوانه‌ای و مستطیلی

عطاله کوهیان*

گروه فیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

فرشته گلیان، محمود قرآن نویس

گروه فیزیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۸۸/۱۰/۲۶

تاریخ دریافت: ۷۹/۶/۳۱

چکیده

مقدمه: مطالعه و اندازه گیری دانسیته الکترونی و دیگر پارامترهای پلاسما توسط منابع مادون قرمز دورسالها است که مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است (طول موجهای بالاتر از ۱۰ میکرون). مناسبترین منابع نوری برای این کار لیزرهایی است که بوسیله لیزر گاز کربنیک پمپ می شود. (HCOOH) باشند. یکی از این لیزرها لیزر اسید فرمیک

هدف: بررسی نظری بازدهی لیزرها ی اسید فرمیک دور با دو ساختار استوانه ای و مستطیلی

روش بررسی: میزان بازدهی و توان خروجی لیزر اسیدفرمیک را در دو ساختار مختلف (موجبر استوانه ای و مستطیلی)، با استفاده از حل معادلات آهنگ و در نظر گرفتن شرایط خاص محاسبه می شود. عملکرد آنها بر اثر تغییر پارامترهای مختلفی از قبیل فشار و میزان توان ورودی لیزر دمش تجزیه و تحلیل می گردد. مقایسه این دو ساختار و بهینه سازی آنها از طریق بررسی روابط حاکم و با Γ و θ موجبر استوانه ای صورت می پذیرد. Γ از مشخصات فیزیکی حفره ی موجبر مستطیلی با X و Y جایگزینی پارامترهای

نتایج: تغییرات بهره و توان خروجی لیزر در دو ساختار موجبر استوانه‌ای و مستطیلی بر حسب پارامترهای مختلف با حل معادلات مشخص و نمودارهای مربوط به دست آمده‌اند. روی این نمودارها ماکزیمم بازدهی برای هر یک از ساختارها مشخص گردید. از روی منحنی تغییرات بهره بر حسب توان ورودی مشاهده می گردد که در یک توان ورودی مشخص مقدار بهره افزایش یافته و به یک ماکزیمم برسد و با افزایش بیشتر توان ورودی حالت

اشباعی رخ می‌دهد که باعث کاهش بهره می‌گردد. در نمودار تغییرات بهره بر حسب طول ملاحظه می‌شود که مقداره بهره به صورت نمایی با افزایش طول رشد نموده و پس از رسیدن به یک مقدار ماکزیمم رو به کاهش می‌گذارد.

نتیجه‌گیری: بررسی نتایج بیانگر این نکته است که اصولاً کارایی اینگونه لیزرها پایین و نتیجه‌ای از فیزیک آن و همینطور توزیعات غیر فضایی غیریکنواخت میدان در درون حفره می‌باشد و دو ساختار مختلف تغییرات چندانی را ایجاد نمی‌نماید.

واژه‌های کلیدی: لیزر اسیدفرمیک، مادون قرمز دور، بازده‌ای، پلاسما، معادلات آهنگ

مقدمه

ناحیه مادون قرمز دور (طول موج‌های بالاتر از ۱۰ میکرون) در سالهای گذشته، نظر بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است، به خصوص هنگامی که کاربرد آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. از مهمترین این کاربردها، اندازه‌گیری پارامترهای مختلف پلاسما، بخصوص دانسیته متوسط الکترونی به شیوه تداخل سنجی لیزرهای FIR می‌باشد. مهمترین و مناسبترین منابع نوری برای این کار، لیزرهای مادون قرمز دور هستند، تا حدود سال ۱۹۷۰ میلادی فقط لیزرهای ملکولی از قبیل H_2O ، D_2N ، H_2N با تخلیه الکتریکی، مورد بررسی قرار گرفته بودند، ولی پس از آن شیوه‌های مناسبتری جهت بررسی ناحیه مادون قرمز و تولید طول موجهای مربوطه بکار گرفته شد.

در سال ۱۹۶۴، Gebbie و همکارانش توانستند لیزر HCN که یک محیط لیزری مرکب از گازهای H و C و N بود را ایجاد نمایند که پرتو خروجی آن در ناحیه مادون قرمز دور قرار داشت.^(۱) در سال ۱۹۷۳ Adam و همکارانش گزارش دادند که با اضافه کردن گاز H_2 به ترکیب گازی لیزر HCN توانسته‌اند به مقدار قابل ملاحظه‌ای توان خروجی را افزایش دهند.^(۱) قبل از سال ۱۹۷۰، Bridge و Change با استفاده از گاز CH_3F و با بدست آوردن طول موجهای ۵۲۱، ۴۵۲ و ۴۹۶ میکرون، اولین لیزر مادون قرمز را طراحی نموده و ساختند، این لیزر با دمش اپتیکی توسط لیزر گاز کربنیک پمپاژ می‌شد، توان‌های خروجی حاصل از دمش اپتیکی لیزرهای FIR به راحتی به چند ده میلی وات می‌رسد.^(۲)

محدودیت لیزرهای مذکور را می‌توان در محدود بودن طول موجهای ایجاد شده ذکر نمود، اکنون به وسیله پمپاژ لیزری ملکولهای مختلف که تعداد آنها شاید به بیش از ۵۰ نوع هم برسد، توانسته‌اند طول موجهایی را ایجاد نمایند که دارای طیف وسیعی در ناحیه FIR می‌باشد، این لیزرها مشهور به لیزرهای مادون قرمز دور با پمپاژ نوری می‌باشند. مشهورترین این لیزرهای ملکولی، لیزر CH_3F می‌باشد که توسط لیزر گاز کربنیک پمپ گردیده و طیف وسیعی حوالی طول موج ۴۹۸ میکرون را تولید می‌کند. این لیزرها در حالت‌های پیوسته و پالسی کار می‌کنند (۲). کاربردهای این نوع لیزرها، روز به روز در حال افزایش است تعدادی از کاربردهای این نوع لیزرها عبارتند از اندازه‌گیری‌های مربوط به پارامترهای مختلف پلاسما بخصوص دانسیته الکترونی آن^(۳) و بررسی

برهمکنش امواج لیزری مادون قرمز دور و پلاسما و دیگر پارامترهای آن. ^(۴) استفاده از تابش زیر میلی متری برای تداخل سنجی در پلاسما جهت اندازه‌گیری چگالی پلاسما و پارامترهای مربوطه. ^(۵) در این مقاله لیزر مادون قرمز دور اسید فرمیک که بوسیله لیزر گاز کربنیک دمش می‌شود و دارای طول موجهای ۳۹۴ و ۴۳۳ و ۵۱۳ میکرون می‌باشد مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

نتایج و بحث

لیزر اسید فرمیک (HCOOH) نیز از جمله لیزرهای گازی - ملکولی است که در ناحیه مادون قرمز دور عمل می‌کند. این لیزر با دمش اپتیکی پمپ می‌شود و منبع دمش آن نیز یک لیزر CO₂ می‌باشد. در بررسی لیزر گازی - ملکولی اسید فرمیک که در ناحیه مادون قرمز دور کار می‌کند، دو پارامتر "توان خروجی" و "کارایی" بسیار مهم هستند. محاسبه توان خروجی و کارایی لیزر نیاز به دانستن بهره لیزر دارد. کارایی موضعی لیزر OPFIR درون یک حجم کوچک به شدت موضعی لیزر بستگی دارد که ۲ یک مختصه فضایی کلی است، با استفاده از بهره لیزر Y_{FIR} و ضرایب جذب گاز در طول موج های لیزر و دمش ترتیب ξ_1 و ξ_2 و ضرایب اتلاف 2α می‌توان نوشت:

$$\eta_r = \frac{I_{FIR}(r) [(Y_{FIR}(r), I_p(r)) - 2\alpha]}{I_p(r) \cdot [\xi(I_p(r)) + \xi_L]} \quad (1)$$

$$\eta_r = \frac{I_{FIR}(r)}{I_i}$$

کارایی کلی η با انتگرال‌گیری از η_r بدست می‌آید که در عمل، کاری بسیار مشکل است. به همین علت یک برش از حفره با سطح مقطع A_Q را در نظر بگیریم و روی این سطح انتگرال می‌گیریم. در این صورت کارایی میانگین عرضی بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\eta_T = \frac{\int A_Q I_{FIR}(r) [r(I_{FIR}(r), I_p(r)) - 2\alpha] dA}{\int A_Q I_p(r) [\xi(I_p(r)) + \xi_L] dA} \quad (2)$$

میزان کارایی برای هر مد با توصیف می‌گردد که به صورت زیر تعریف خواهد شد.

$$\eta_M = \frac{\int A_C \left(1 + \frac{I_{FIR}(r)}{I_{S, FIR}}\right) \gamma_0(r) dA}{\left(\int A_Q \left(\frac{I_{FIR}(r)}{I_{S, FIR}}\right)^2 dA \int A_Q \gamma_0^2(r) dA\right)^{1/2}} \quad (2)$$

که در این رابطه γ_0 بهره سیگنال کوچک بوده و از رابطه پیروی می‌کند که $I_{S, FIR}$ شدت اشباع می‌باشد.

در نتیجه کارایی تک مد η توسط انتگرال‌گیری بصورت زیر خواهد بود.

$$\eta = \frac{1}{L} \int \eta_T \eta_M dr \quad (4)$$

که L طول حفره است.

همانطوریکه در معادله (۱) مشخص می گردد کارآیی توسط پارامترهای پارامترهای Y و g و همچنین اتلاف تابش α و ξ که از اثرات موجبراست تعیین می گردد. محاسبات ما برای ξ و g مدلی معادله آهنگ پایه گذاری شده است. در این مدل همه ترازهای ارتعاشی - چرخشی که مستقیماً به انتقالات لیزر یا پمپ مرتبط نیستند، با هم به صورت منابع حرارتی حالت پایه ارتعاشی ($v=0$) و اولین حالت برانگیخته ارتعاشی ($v=1$) جمع شده اند. بهره یک باریکه عبوری لیزر FIR بصورت زیر می باشد:

$$\gamma = \Delta N(r) \cdot \frac{h}{\lambda_{FIR}} \cdot B_{21} \cdot g(f_{FIR}) \quad (5)$$

که در این $\Delta N(r)$ رابطه اختلاف جمعیت بین ترازهای لیزر، λ_{FIR} طول موج FIR، B_{21} ضریب انیشتین و $g(f_{FIR})$ پروفیل خط و τ_{SL} طول عمر لحظه ای انتقال لیزر می باشد. با فرض اینکه طول عمر چرخش بسیار کوچکتر از طول عمر ارتعاشی است خواهیم داشت:

$$\Delta N(r) = \frac{\tau_R \cdot R_{pump}(r) + V_{rot} [\tau V \cdot R_{pump}(r) + \Gamma]}{1 + \tau_R \cdot R_L(r) \cdot [1 + g^2/g_1]} \quad (6)$$

که V_{rot} ضریب توصیف کننده اختلاف جمعیت در منبع حرارتی است و τ جمعیت حالت ارتعاشی ($v=1$) در تعادل حرارتی می باشد، R_L آهنگ انتقالات القایی لیزر و R_{pump} ضرایب تبهگنی ترازهای لیزر و دانسیته منبع دمش است. از طرفی داریم:

$$V_{rot} = f_2 - \frac{g_2}{g_1} f_1 \quad (7)$$

که f_2 و f_1 کسرهای منابع چرخشی جمعیت بولتزن در ترازهای لیزر است. همینطور داریم:

$$\Gamma = \beta P e^{-\beta h f_p} [1 - e^{-\beta h f_p}] \quad (8)$$

که $\beta = \frac{1}{KT}$ و K ثابت بولتزن و T دمای مطلق و P فشار گاز و فرکانس پمپ است از طرفی می توان بسادگی و با استفاده از معادلات قبلی دریافت که:

$$R_{pump}(r) = \frac{1}{h f_p} \cdot \xi [I_p(r)] \cdot I_p(r) \quad (9)$$

آهنگ گسیل القایی نیز از رابطه بدست می آید

$$R_L = \frac{\lambda^2 \cdot g(f_{FIR})}{\pi \cdot \tau_{SL} \cdot h f_{FIR}} \cdot I_{FIR} \quad (10)$$

علاوه بر تعیین آهنگ تابش القایی و دانسیته منبع دمش در معادله (۶)، توزیع شدت FIR و پمپ مورد نیاز هستند، باریکه لیزر اصولاً شکل حلقوی دارد. فرض شده است که پروفیل شدت عرضی پمپ بطور $I_p(Q)$ خالص گوسین باشد و دارای پهنای باشد که به صورت زیر داده می شود.

$$I_p(Q) = \frac{2P_p}{\pi W_p^2} \exp\left[-2 \frac{Q^2}{W_p^2}\right] \quad (11)$$

میدان FIR درون موجبر با یک مد خالص با توزیع زیر ملاحظه می شود.

$$I_{FIR}(Q) = \frac{P_{FIR}}{a_R^2 \cdot \pi \cdot J_1^2(\mu)} \cdot J_0^2\left[\mu \left[\frac{Q}{a_R}\right]\right] \quad (12)$$

که توان FIR، شعاع لوله است، توابع بسل هستند و اولین صفر است. با استفاده از معادلات فوق می توان توان خروجی مربوط به لیزر اسیدفرمیک مادون قرمز دور در حالت معمولی (موجبر با تقارن استوانه ای) را محاسبه و نتایج را به حالت مستطیلی تعمیم داد. در لیزر اسیدفرمیک با ساختار مستطیلی گاز میان دو صفحه فلزی موجبر جریان می یابد و فاصله این دو صفحه را با پارامتر $2a$ مشخص می کنند که این پارامتر قابل تغییر می باشد، باریکه پمپ غالباً یک مسیر زیگزاگ را طی می کند و موازی محور X است، بهره دیفرانسیلی در این حالت به سه پارامتر Z و Y و X بستگی دارد، در حالت مستطیلی لیزر با تقویت کننده بطور عرضی پمپ می شود.

بررسی لیزر حالت مستطیلی اغلب آسانتر از ساختار استوانه ای است، زیرا در ساختار مستطیلی، باریکه FIR و باریکه پمپ به طور مجزا و با اپتیک متفاوت هستند. در این حالت بهره دیفرانسیلی به پارامترهای Z و Y و X بستگی دارند.

$$\gamma_{diff}(x, y, z) - \Delta N(x, y, z) \times \frac{h}{\lambda_{FIR}} B_{21} \cdot g(f) = \Delta N(x, y, z) \cdot \frac{\lambda_{FIR}^2}{8\pi^2 L} g(f) \quad (13)$$

که γ_{diff} روی همه سطح مقطع باریکه FIR انتگرال گرفته می شود. میزان تقویت توان خروجی FIR به توان ورودی P_{in} عبوری از میان سیستم مستطیلی را که دارای طول L است به فرم زیر بدست می آید. اگر G بهره موثر باشد خواهیم داشت:

$$P_{FIR out} = e^{GL} \cdot P_{FIR in} \quad (14)$$

بقیه روابط تقریباً مشابه حالت استوانه ای لیزر است با این تفاوت که بجای مختصه r از مختصه x استفاده می شود.

با فرض اینکه توزیع شدت در این لیزر عمود بر صفحات باشد (جهت x) داریم:

$$I_p(x) = I_{p0} \cos^2 \left[\frac{\pi x}{2a_s} \right] \quad - a_s \leq x \leq a_s \quad (15)$$

که این شدت باریکه پمپ است و I_{p0} شدت ماکزیمم پمپ است و $2a_s$ فاصله صفحات است. فرض شده است که در حالت ایده آل شدت FIR دارای شکل گوسین موازی با صفحات و در جهت y و دارای پهنای W_{FIR} باشد ، بنابراین :

$$I_{FIR}(x, y) = \frac{P_{FIR}}{a_s W_{FIR} \gamma(\pi/2)^{1/2}} \times \quad (16)$$

$$\cos \left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{x}{a_s} \right] \exp \left[-2 \frac{y^2}{W_{FIR}^2} \right]$$

برای لیزر با موجبر متقارن استوانه‌ای پارامترهای متغیر عبارت اند از ، شعاع تیوبهای موجبر a_R ، پهنای باریکه $\frac{W_p}{a_R}$ نسبی

توان P_p پمپ و برای حالت مستطیلی، فضای صفحات $2a_s$ ، شدت ماکزیمم پمپ I_{p0} .

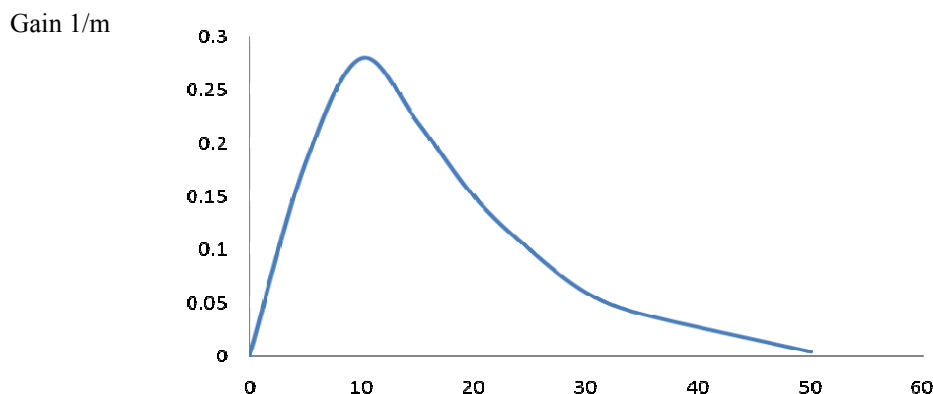
نتایج حاصل از محاسبات برای لیزر اسید فرمیک در دو ساختار استوانه و مستطیلی در شکل های زیر نمایش داده شده است. نمودار های ۱ و ۲ مقادیر بهره ی موثر در طول موج ۴۳۳ میکرون بر حسب فشار درون سیستم با ساختار استوانه ای و مستطیلی نشان داده شده است. توان لیزر دمش در حدود ۳۰ وات در نظر گرفته شده است. در لیزر با ساختار استوانه ای ماکزیمم بازده ای برابر ۲۶ درصد است در حالیکه برای لیزر مستطیلی ۲۷ درصد می باشد و مقدار ماکزیمم (η_m) در هر دو مورد تقریباً یکسان است. در این حالت پارامترهای بهینه برای حالت استوانه ای عبارتند از :

$$P_p \approx 50 W \frac{W_p}{a_R}, \quad a_R \approx 15mm$$

و برای حالت مستطیلی :

$$I_{p0} = 50 \frac{W}{cm^2}, \quad a_s \approx 3mm$$

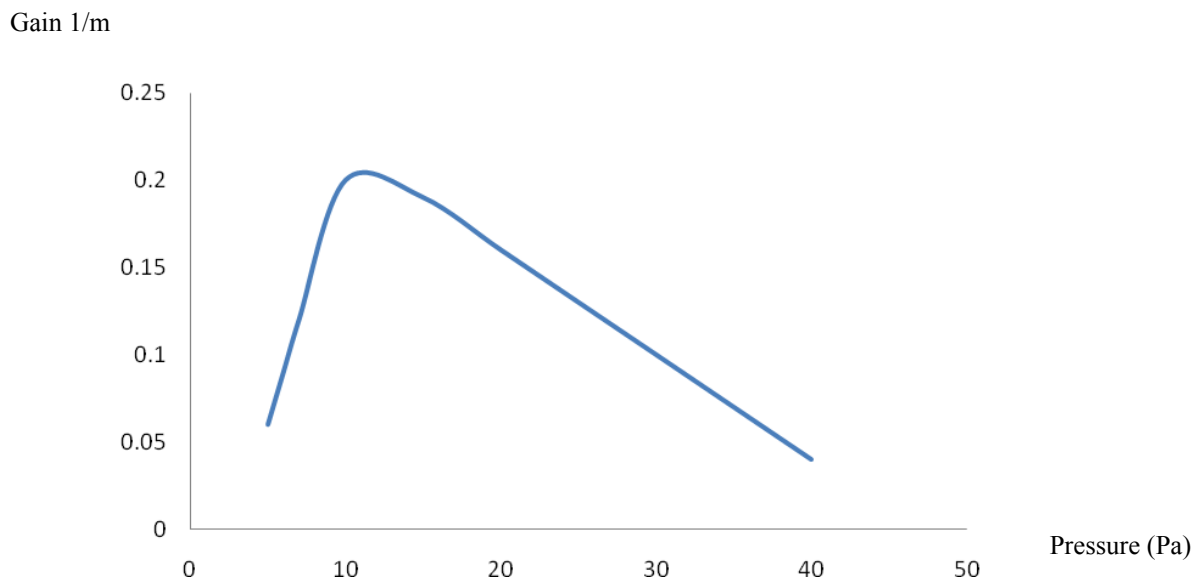
توان P_{FIR}^{FIR} استوانه‌ای به آرامی در طی مسیر باریکه FIR تغییر می کند و فشار گاز درون حجم حفره ثابت است.



شکل ۱- نمودار بهره بر حسب فشار برای ساختار مستطیلی

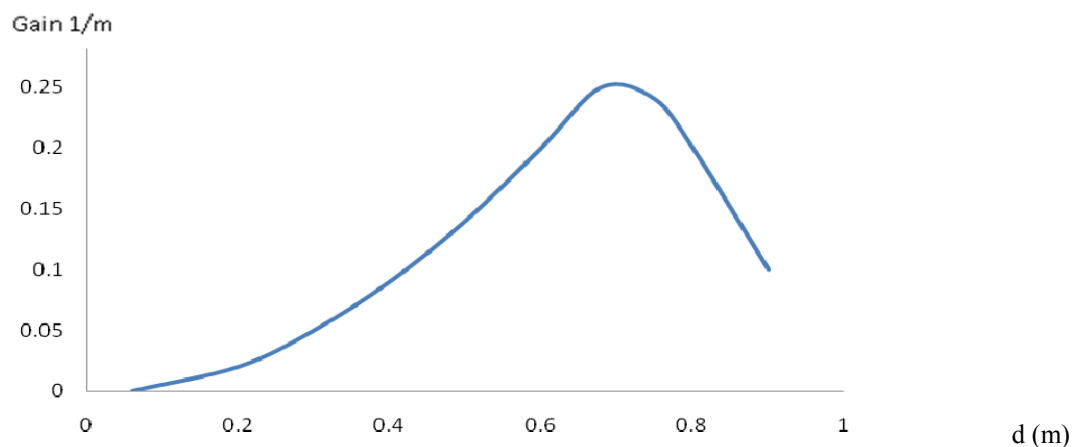
$$m, 2a=10mm, P_{in}=0.3mw, P_{pump}=28w, 9R20 \mu 433 = \lambda$$

Pressure (Pa)



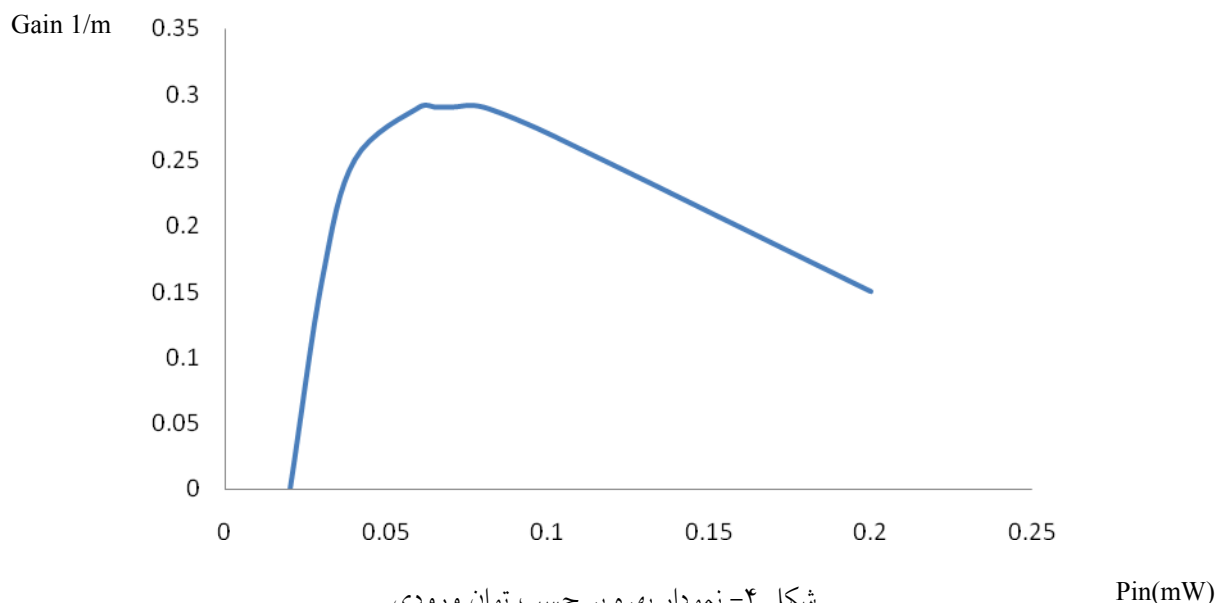
شکل ۲- نمودار بهره بر حسب فشار برای ساختار استوانه ای
 $m, 2a=10\text{mm}, P_{in}=0.3\text{mw}, P_{\text{pump}}=28\text{w}, 9R20, \mu 433 = \lambda$

در حالت کلی، کارایی پائین لیزرهای OPFIR CW نتیجه‌ای از فیزیک آنها و همینطور توزیعات فضایی غیر یکنواخت میدان آنهاست. جذب توان پمپ پهن شده و انتقال انرژی عرضی توسط پراش، بهره لیزر و ضریب توان پمپ پهن شده و انتقال انرژی عرضی توسط پراش، بهره لیزر و ضریب جذب را به کمترین مقدار محدود می‌کند. انتخاب یک لیزر مستطیلی نمی‌تواند این وضعیت را به طور مهم اصلاح کند. اما بدون ساختار مستطیلی، هیچ پایه آزمایش استواری برای اثبات این نتایج تئوری نداریم. همچنین در شکل های ۳ و ۴ نمودار های بهره بر حسب توان ورودی و طول حفره ی لیزر رسم شده است. در نمودار ۴ تغییرات بهره بر حسب توان ورودی مشاهده می‌گردد که در یک توان ورودی مشخص مقدار بهره افزایش یافته و به یک ماگزیمم میرسد و با افزایش بیشتر توان ورودی حالت اشباعی رخ می‌دهد که باعث کاهش بهره می‌گردد و در نمودار تغییرات بهره بر حسب طول ملاحظه می‌شود که مقدار بهره به صورت نمایی با افزایش طول رشد نموده و پس از رسیدن به یک مقدار ماگزیمم رو به کاهش می‌گذارد.



شکل ۳- نمودار بهره بر حسب طول لیزر

$$m, a=3\text{mm}, P_{in}=0.26\text{mw}, P_{\text{pump}}=30\text{w}, 9R20, P=15\text{pa}, \mu 433 = \lambda$$



شکل ۴- نمودار بهره بر حسب توان ورودی
 $m, 2a=3\text{mm}, P_{\text{pump}}=30\text{w}, 9R20, P=10\text{pa } \mu 433 = \lambda$

نتیجه گیری

همانطور که مشاهده می شود الگوی منحنی بهره در هر دو حالت استوانه ای و مستطیلی تقریباً یکسان است ولی طرح مستطیلی اجازه عمل لیزر در فشارهای بالاتر گاز را می دهد. ضمناً می توان نتایج زیر را از محاسبات استنتاج نمود: که در فشار پائین، بهره G به واسطه اشباع بالای FIR و پمپ برای هر دو ساختار کوچک می شود و زمانیکه فشار P افزایش می یابد، اشباع FIR کوچک می شود، و در همین حال وارونی جمعیت بیشتر می شود، نتیجه اینکه G افزایش می یابد، کاهش اشباع پمپ و افزایش اثر گرمایی باعث می شود، افزایش به آرامی کند شود. در این حالت G به یک ماکزیمم می رسد. علاوه بر آن محاسبات نشان می دهد که هنگامی که ضخامت بین صفحات در ساختار مستطیلی کم می شود، با توان ورودی کمتری می توان FIR را ماکزیمم کرده و به G بالا دست یافت.

References:

1. Hodges, D.A., Journal of Applied Physics, **18**, 375 (1978).
2. DeTemple, T., *Infrared and millimeter waves*, **1**(3) (1970).
3. Harth, A.N., *Infrared phys. Technol.*, **36**(L), 123 (1995).
4. Harth, A., Volkhoiz, P., *Int. J. of infrared and millimeter waves*, **15**, 2 (1994).
5. HoriORI, T., Hiromoto, N., *J. Appl. Phys.*, **32**, 5552 (1993).
6. Bakos, J.S., *Infrared Physics*, **32**, 13 (1991).
7. Chantry, G.W., *submillimeter spectroscopy*, Academic Press, New York (1971).