بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

محاسبه مدی تشدیدگر ناپایدار خودپالاینده (SFUR) برای لیزر پرتو ایکس نرم در دو بعد

غزاله غنی مقدم، امیرحسین فرهبد

پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، انتهای کارگر شمالی ، تهران.

چکیده – در این پژوهش رفتار مدی تشدیدگر ناپایدار خودپالاینده(*SFUR*) در دو بعد با بزرگنمایی هندسی ۲/۵- = *M* برای لیزر پرتو ایکس نرم شبه نئون آهن با طول موج *nm* ۲۵/۵ و بیشینه بهره cm^{-1} ۱۳ مورد بررسی نظری قرار گرفته و تاثیر پهنای روزنه محدود کننده میدان در انتشار مد خروجی بدست آمده است. همچنین با استفاده از ضریب M^2 به بررسی کیفیت پرتو خروجی این نوع تشدیدگر پرداخته شده است که در مقایسه با تشدیدگر صفحه موازی با طول معادل ضریب کیفیت کوچکتر و بنابراین پرتو خروجی تشدیدگر خود پالاینده دارای واگرایی کمتر و کیفیت مدی بهتری است.

کلید واژه- تشدیدگر ناپایدار خود پالاینده، گسیل خودبخودی تقویت شده، لیزر پرتو ایکس نرم.

Two dimensional Mode Analysis of a Self-Filtering Unstable Resonator(SFUR) for Soft X-Ray Laser

G. Ghani-Moghadam, A. H. Farahbod

Research school of plasma and nuclear fusion, INST, North Kargar, Tehran.

Abstract- In this paper, a self-filtering unstable resonator (SFUR) with geometrical magnification M =-2.5 in two dimension, for Ne-like Fe soft x-ray laser at 25.5 nm, and maximum gain 13 cm^{-1} has been theoretically investigated and the role of field-limiting aperture in mode propagation has been shown. Also, beam quality factor M^2 has been calculated and output mode behavior investigated and compared with a plane-parallel (PP) resonator of equal length. The calculations indicate that the M^2 factor in SFUR resonator is much smaller than PP resonator and therefore output beam divergence is smaller and the mode quality is better.

Keywords: Self-filtering unstable resonator (SFUR), Amplified spontaneous emission (ASE), Soft x-ray laser (SXRL)

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]

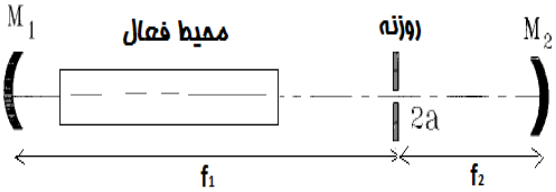
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

۱- مقدمه

تشدیدگرهای ناپایدار شاخه منفی دارای نقطه کانونی حقیقی درون کاواک هستند که موجب متمرکز شدن توزیع میدان و بروز آسیب به محیط فعال و قطعات اپتیکی پیرامون نقطه کانونی می شوند. تشدیدگر ناپایدار خودپالاینده(SFUR) اولین بار توسط گوبی و ریالی جهت رفع این اثر مخرب معرفی شد[۱]. در تشدیدگر SFUR که تشدیدگر ناپایدار هم کانونی نامتقارن شاخه منفی است، روزنه ای با قطر ۲a در نقطه کانون مشترک دو آینه مقعر به فاصله های کانونی f_1 و f_2 و بزرگنمایی $M=-f_1/f_2$ قرار دارد. در تشدیدگر SFUR به دلیل تشکیل سریع مد در اولین گردش، توزیع شدت هموار، واگرایی در حد پراش و همدوسی فضایی بالا برای محیط های فعال با طول عمر کوتاه بهره حاصل می شود. این نوع تشدیدگر با محیط های فعال گوناگون لیزر مورد مطالعه قرار گرفته است[۲و۳]. در این پژوهش برای نخستین بار به بررسی نظری تشدیدگر ناپایدار خودپالاینده دو بعدی برای لیزر پرتو ایکس نرم شبه نئون آهن پرداخته شده است. گسیل خودبخودی تقویت شده(ASE) حاصل از برهمکنش تپ لیزرهای پرتوان با سطح هدف جامد، از نوع پرتو ایکس نرم با قطبش تصادفی است. برای بهبود خصوصیات لیزر پرتو ایکس نرم روش های گوناگونی به کار رفته است[۴و۵]. یکی از این روش ها استفاده از تشدیدگر یا نیم-تشدیدگر است. اولین کاربرد تشدیدگر پایدار در طول موج ۲۰/۶ nm به وسیله Ceglio و همکارانش با آینه‌های چندلایه ای Mo/Si گزارش شده است[۴]. مشکل طراحی تشدیدگر پایدار در این ناحیه طول موجی، آینه ها هستند که جذب بالایی دارند. آزمایشات دیگری نیز در این زمینه با استفاده از نیم-کاواک که از یک آینه تشکیل شده، انجام شده است[۵]. برای غلبه بر مشکلات اشاره شده، در این پژوهش به بررسی نظری تشدیدگر ناپایدار خودپالاینده برای لیزر پرتو ایکس و بررسی کیفیت پرتو خروجی از آن می پردازیم. از مزیت های انتخاب این تشدیدگر نسبت به تشدیدگرهای پایدار می‌توان به کاهش واگرایی، درخشایی بیشتر، توزیع شدت خروجی با نیمرخ فضایی گاوسی و تعداد کم رفت و برگشت مورد نیاز برای تشکیل مد اشاره کرد.

۲- سیستم تشدیدگر ناپایدار خودپالاینده

آرایش اپتیکی تشدیدگر ناپایدار خودپالاینده در شکل(۱) آمده است.



شکل ۱: تشدیدگر ناپایدار خودپالاینده

در تقریب پیرامحوری، میدان انتشاریافته در این سیستم اپتیکی با استفاده از انتگرال هویگنس به دست می‌آید[۶]. برای یک گردش کامل می‌توان با استفاده از دو نیم گردش، ابتدا از روزنه محدود کننده میدان تا آینه M_2 و بازتاب میدان به روزنه و سپس از روزنه به آینه ی M_1 و بازتاب آن تا سطح روزنه را محاسبه کرد.

$$u_0(x,y)=\int_{-a}^{a}\int_{-a}^{a}\int_{-a}^{a}\int_{-a}^{a}u_i(x'',y'')\,K_2(x'',y'';x',y')K_1(x',y';x,y)dx'dx''dy'dy'' \qquad (۱)$$

در رابطه ۱ $u_i(x'',y'')$ و $u_0(x,y)$ به ترتیب دامنه های میدان در صفحات ورودی و خروجی سیستم اپتیکی، ۲a پهنای روزنه محدود کننده میدان و $K_1(x',y';x,y)$ و $K_2(x'',y'';x',y')$، کرنل‌های هویگنس هستند که به صورت ذیل تعریف می شوند:

$$K_1(x',y';x,y)=(i/\lambda B_1)\times \exp\left[-ik\frac{A_1(x'^2+y'^2)-2(xx'+yy')+D_1(x^2+y^2)}{2B_1}\right] \qquad (۲)$$

$$K_2(x'',y'';x',y')=(i/\lambda B_2)\times \exp\left[-ik\frac{A_2(x''^2+y''^2)-2(x'x''+y'y'')+D_2(x'^2+y'^2)}{2B_2}\right] \qquad (۳)$$

عناصر ماتریس $A_1B_1C_1D_1$ نیم گردش اول از روزنه تا آینه M_2 و بازتاب به روزنه و ماتریس $A_2B_2C_2D_2$ نیم گردش دوم از روزنه تا آینه M_1 و بازتاب به روزنه را توصیف می کنند.

با قرار دادن محیط بهره لیزر پرتو ایکس نرم در این تشدیدگر، توزیع میدان و شدت خروجی از تشدیدگر قابل

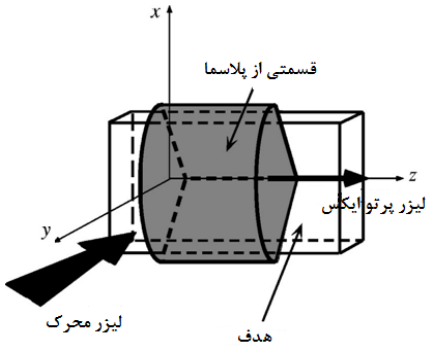
[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]

محاسبه است. در این پژوهش یک روزنه مربعی با ابعاد ۲a در دو جهت x و y در تشدیدگری با پارامترهای جدول(۱) در نظر گرفته شده است.

جدول۱: پارامترهای تشدیدگر شبیه سازی شده

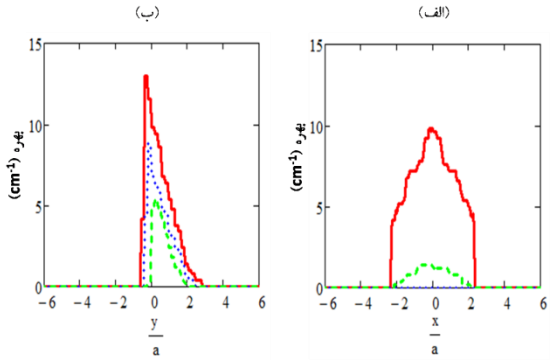
بزرگنمایی (M)	f_1 (cm)	f_2 (cm)	2a (μm)	طول محیط فعال (cm)
-۲/۵	۱	۰/۴	۱۴/۲۸	۰/۲

شکل(۲) نمایه ای از یک لیزر پرتو ایکس نرم و مختصات استفاده شده در محاسبات را نشان می دهد.



شکل۲: نمایه ای از یک لیزر پرتو ایکس.

محیط بهره لیزر پرتو ایکس نرم شبه نئون آهن در طول موج ۲۵/۵ nm از کد هیدرودینامیکی ARWEN و مدل سه ترازی در مرجع[۷] به دست آمده است. سطح جامد آهن به وسیله سه پالس لیزری دمیده می شود. طول موج لیزر دمش λ=۸۰۰nm و دارای پهنای فضایی ۲۰μm می باشد. از آنجایی که بهره در نمودارهای دو بعدی(x, y) در مرجع [۷] با رنگ از یکدیگر متمایز شده، لازم است تا

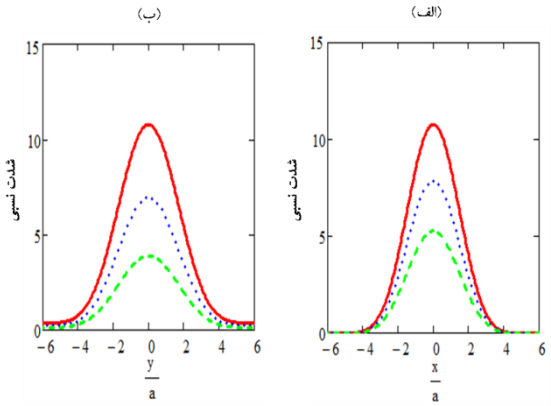


شکل۳: ضریب بهره سیگنال کوچک. (الف) بهره در جهت x (خط پر (—) در y=0 ، نقطه چین (''''') در y=-۱/۳۵a و خط بریده (---) در y=۲/۰۳a). (ب) بهره در جهت y (خط پر (—) در x=0 ، نقطه چین (''''') در x=-۱/۳۵a و خط بریده (---) در x=۲/۰۳a).

ابتدا تصاویر رنگی را تجزیه و تحلیل کرده تا داده های عددی بهره را در هر نقطه به دست آوریم. این عمل با استفاده از نرم افزارهای Matlab و Origin صورت گرفته و داده‌های بهره در شکل(۳) در دو جهت x و y ترسیم شده است.

۳- نتایج شبیه سازی ها

مرکز روزنه محدود کننده میدان را در مختصات (۰,۰) در نمودار محیط بهره قرار می دهیم. شدت لیزر پرتو ایکس نرم شبه نئون آهن پس از یک گردش کامل درون تشدیدگر مورد نظر نسبت به شدت پرتو گسیل خودبخودی تقویت شده (ASE)، در شکل(۴) آمده است. در محاسبات، بهره را مستقل از زمان در نظر می گیریم. شکل(۴) تقویت ۱۰~ برابری شدت در مرکز توزیع شدت را پس از یک رفت و برگشت نشان می دهد.

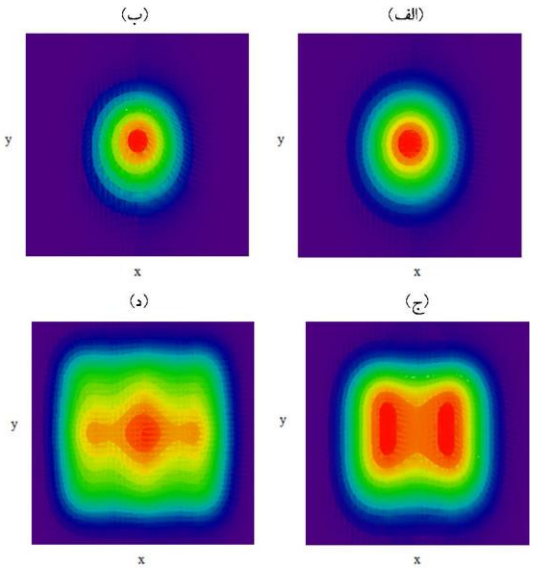


شکل۴: شدت نسبی محاسبه شده برای لیزر پرتو ایکس نرم شبه نئون آهن پس از یک بار رفت و بازگشت کامل در تشدیدگر ناپایدار خودپالاینده. (الف) در جهت x (خط پر (—) در y=0 ، نقطه چین (''''') در y=-۱/۳۵a و خط بریده (---) در y=۲/۰۳a). (ب) در جهت y (خط پر (—) در x=0 ، نقطه چین (''''') در x=-۱/۳۵a و خط بریده (---) در x=۲/۰۳a).

اثر پهنای روزنه در تشکیل مد و واگرایی پرتو خروجی پس از یک گردش کامل درون تشدیدگر نیز مورد بررسی قرار گرفته است. شکل(۵) تصویر دو بعدی از مدهای تشدیدگر SFUR با محیط بهره لیزر پرتو ایکس نرم را برای پهنای متفاوت روزنه محدود کننده میدان نشان می دهد. پهنای روزنه بهینه در تشدیدگر SFUR در مختصات دکارتی از رابطه $2a=2\sqrt{0.5\lambda f_2}$ به دست می آید[۶]. در تشدیدگر شبیه سازی شده این پهنا برابر است با 2a=۱۴/۲۸ μm. شکل(۵-الف) توزیع شدت مدی را

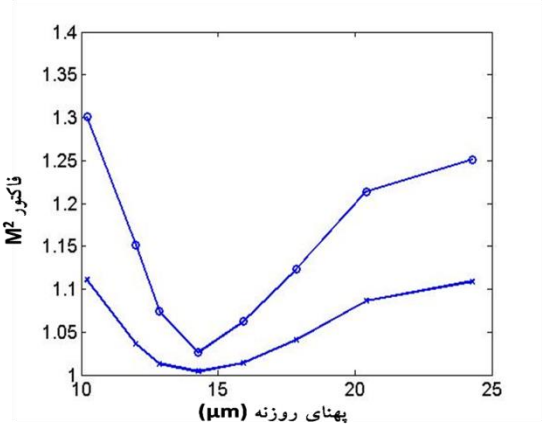
[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]

برای پهنای بهینه نشان می دهد.



شکل۵: توزیع مدی تشدیدگر SFUR با محیط بهره لیزر پرتو ایکس نرم برای اندازه های متفاوت روزنه محدود کننده میدان . (الف) ۲a=۱۴/۲۸ μm (ب) ۲a=۰/۸(۱۴/۲۸) μm، (ج) ۲a=۱/۴(۱۴/۲۸) μm، (د) ۲a=۱/۷(۱۴/۲۸) μm.

یکی از مزایای تشدیدگرهای SFUR، کاهش واگرایی پرتو خروجی است. واگرایی پرتو خروجی از تشدیدگر را با استفاده از ضریب کیفیت M^2 و محاسبه تابع وزنی شدت به روش سیگمن[۸] بررسی کرده ایم. این ضریب در حالت ایده آل گاوسی برابر با ۱ و در غیر اینصورت بزرگتر از ۱ می باشد. در شکل(۶) ضریب M^2 در جهت x برای تشدیدگر SFUR با پهنای متفاوت روزنه در دو حالت حضور محیط بهره لیزر پرتو ایکس نرم و بدون حضور بهره محاسبه شده است. همانطور که از شکل مشخص است، حضور بهره در تشدیدگر باعث کاهش ضریب M^2 در جهت x و در نتیجه کاهش واگرایی در این راستا می شود. همچنین برای تشدیدگر SFUR با پهنای بهینه روزنه و با حضور بهره، کمترین مقدار M^2 (M^2=۱/۰۰۴) و در واقع یک نمودار شدت شبه گاوسی حاصل می شود. این اثر در توافق کامل با نتایج تجربی مرجع [۳] در رابطه با تشدیدگر SFUR برای لیزر رنگ می باشد. همچنین ضریب M^2 در یک تشدیدگر صفحه موازی با طول معادل برابر با ۳/۵۲ به دست آمد، که در مقایسه با تشدیدگر SFUR، بسیار بزرگتر است، بنابراین پرتو خروجی از تشدیدگر SFUR دارای کیفیت بالاتری است.



شکل۶: ضریب M^2 در راستای x برای پهنای متفاوت روزنه محدودکننده میدان در تشدیدگر SFUR. (×) نماد تشدیدگر با حضور بهره و (o) نماد تشدیدگر بدون حضور بهره است.

۴- نتیجه گیری

محاسبات مدی ارائه شده در این پژوهش برای تشدیدگر SFUR نقش اندازه روزنه محدود کننده میدان در بهبود کیفیت لیزر پرتو ایکس نرم را با در نظر گرفتن نقش محیط فعال نشان می دهد. با توجه به کوتاهی طول عمر بهره‌ی لیزرهای پرتو ایکس نرم، استفاده از تشدیدگر ناپایدار خودپالاینده می‌تواند منجر به تشکیل مد پایه تشدیدگر تنها با یک گردش کامل نور گردد که از کیفیتی به مراتب بهتر از گسیل خودبخودی تقویت شده برخوردار است. همچنین به دلیل استفاده از روزنه پالاینده فضایی شدت پرتوی خروجی دارای کیفیتی بالا و با واگرایی کوچک در حد محدود شده پراشی است.

مراجع

[1] P.G. Gobbi and G.C. Reali, "*A novel unstable resonator configuration with a self-filtering aperture*", **Opt. Commun**. 52, 195-198 (1984).

[2] V. Boffa *et al*., "*Self-filtering unstable resonator operation of XeCl excimer laser*", **IEEE J. Quant. Electron**. 23, 1241-1244 (1987).

[3] A.H. Farahbod and A. Hariri, "*Application of generalized self-filtering unstable resonator to a N_2-laser pumped dye laser*', **Opt. Cummun**. 108, 84-90 (1994).

[4] N. M. Ceglio *et al*., "*Multipass amplification of soft x rays in a laser cavity*", **Opt. Lett**. 13, 108 (1988).

[5] T. Mocek *et al*., "*Beam properties of a deeply saturated, half-cavity zinc soft-x-ray laser*", **J. Opt. Soc. Am. B**. 20, 1386 (2003).

[۶] حریری، اکبر، "*فیزیک لیزر پیشرفته*"، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، ۱۳۹۰.

[7] E. Oliva *et al*., "*Hydrodynamic study of plasma amplifiers for soft-x-ray lasers: A transition in hydrodynamic behavior for plasma columns with widths ranging from 20 μm to 2 mm*", **Phys. Rev. E** 82, 056408 (2010).

[8] A. E. Siegman, "*How to (maybe) measure laser beam quality*", **OSA TOPS**. 17, 184 (1998).

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]