

afarahbod@aeoi.org.ir :

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۵/۱۱؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۱/۹/۱۶)

Nd:YAG

Q

قرار دارند. از ترکیب چند سنجه فابری-پرو<sup>۲</sup> با ضخامت‌های متفاوت و قرار دادن آنها درون تشدیدگر می‌توان تپ لیزر با تک مد طولی پدید آورد. برای این منظور از سنجه ضخیمی که دارای پهنای خط باریک و بازه بینابی آزاد<sup>۳</sup> کوچک است به همراه سنجه نازکی با پهنای خط گسترده‌تر و بازه بینابی آزاد بزرگتر استفاده می‌شود [۱-۴]. برای به دست آوردن تپ خروجی تک مد طولی لازم است شرایط زیر در طراحی نوسانگر مورد نظر قرار گیرد:

۱. طول تشدیدگر تا حد ممکن کوتاه باشد تا فاصله بینابی میان

یکی از ویژگی‌های مهم لیزر تکفامی آن است. برای برخی کاربردها نظیر آینه‌های مزدوج فازی، سنجش از دور، و طیف سنجی تمهیدات ویژه‌ای برای به دست آوردن پهنای بینابی باریکتر و تکفامی بیشتری مورد نیاز است [۱، ۲ و ۷]. برای این منظور لازم است تا نوسانگر لیزر بر روی یک مد طولی نوسان نماید تا باریکترین پهنای بینابی ممکن به دست آید.

غالباً از سنجه<sup>۱</sup> درون تشدیدگر برای کاهش تعداد مدهای طولی استفاده می‌شود [۱]. در این حالت خروجی لیزر شامل تعداد محدودی مد طولی است که در نوار بینابی عبوری سنجه

۲. Fabry-Perot

۳. Free spectral range

۱. Etalon

گرفت. جهت بررسی توزیع بینایی و ساختار مدی نیز از سنجه دیگری در خارج از نوسانگر استفاده شد. با در نظر گرفتن روابط موجود میان قطر حلقه‌ها و فاصله میان دو حلقه از الگوی تداخلی فابری-پرو، تعداد مدها و توزیع بینایی تب خروجی لیزر به دست آمده است.

برای تشدیدگر با طول نوری  $L$  و دو آینه تخت موازی، بسامد مدهای طولی امواج ایستاده درون تشدیدگر با رابطه (۱) داده می‌شود که در آن  $q$  یک عدد صحیح است [۱ و ۲]

$$v = \frac{qc}{2L} \quad (1)$$

بسامدهای تشدیدی به فاصله یکسان از یکدیگر قرار دارند، بنابراین فاصله دو مد طولی مطابق با رابطه (۲) است

$$\Delta v = \frac{c}{2L} \quad (2)$$

برای تشدیدگر حلقوی به طول  $L$  با امواج روان تک سویه، فاصله مدهای طولی  $\Delta v_{ring} = \frac{c}{L}$  است که دو برابر مقداری است که از رابطه (۲) به دست می‌آید [۲]. تعداد کل مدهای طولی با فاصله لازم برای یک گردش کامل فوتون درون تشدیدگر، پهنای نوار محیط فعال لیزر و نوع پهن شدگی آن تعیین می‌شود. برای لیزرهای حالت جامد غالباً فاصله مدی بسیار کوچکتر از پهنای طیفی بهره محیط فعال است و بدین ترتیب چندین مد طولی می‌توانند همزمان به نوسان درآیند.

برای نوسانگر با امواج ایستاده، حتی برای یک نمایه بهره کاملاً همگن معمولاً نقاطی از محیط فعال وجود دارد که در آن میدان الکتریکی صفر است و وارونی انبوهی غیرتهی باقی می‌ماند، لذا مدی که در ابتدا بهره پایینی داشته و به اندازه ربع موج نسبت به مد مجاور خود جابه‌جا شده است، می‌تواند به بهره‌ای بالاتر دست یابد و در نتیجه بهره با پدیده چاله سوز فضایی مواجه می‌شود. بنابراین هر تغییری در طول موج لیزر به دلیل تغییر در ضریب شکست و یا تغییر در طول تشدیدگر به دلیل امواج اکوستیکی می‌تواند منجر به افت و خیز در شدت جفت شدگی میان مدی شود و از تک مد شدن نوسان لیزر

مدهای طولی افزایش یابد و مدهای طولی کمتری به آستانه نوسان برسند.

۲. حذف چاله سوز فضایی<sup>۱</sup> ناشی از امواج ایستاده درون تشدیدگر لیزر.

۳. پایداری مکانیکی اجزا تشدیدگر.

برای حذف اثر چاله سوز فضایی می‌توان از چیدمان تشدیدگر حلقوی تک سویه استفاده کرد. کاواک حلقوی با ایجاد امواج رونده و اشباع یکنواخت بهره سبب حذف این اثر می‌شود. به طور متداول فرآیند تک سویه کردن انتشار میدان در تشدیدگر، به وسیله ایزولاتورهای نوری<sup>۲</sup> شامل چرخاننده فارادی، چرخاننده دوطرفه<sup>۳</sup> و یک قطبشگر<sup>۴</sup> انجام می‌شود [۲]. در این روش اتلاف در تشدیدگر افزایش یافته و کارایی لیزر کاهش می‌یابد. برای بلورهای لیزری که دارای دوشکستی‌اند و یا هنگامی که اثرات دوشکستی دیگری در تشدیدگر وجود دارد، دو روش آخر قابل انجام نیست. روش‌های دیگری نیز مانند مدولاتور اکوستوپاتیکی موج رونده، برای القای فرآیند تک سویه مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴].

در این پژوهش به منظور ایجاد امواج روان تک سویه درون تشدیدگر حلقوی از یک آینه تمام بازتابان بعد از شکافنده باریکه<sup>۵</sup> برای تبدیل امواج پادساعتگرد به امواج ساعتگرد استفاده شده است [۵]. از یک منشور داو<sup>۶</sup> با زاویه بروسر برای دو سطح ورودی و خروجی در طول موج نوسان لیزر، برای چرخش تصویر و همزمان به عنوان قطبشگر استفاده شده است. استفاده از منشور داو باعث کاهش حساسیت تنظیم آینه‌ها و افزایش پایداری نوسانگر لیزر می‌شود [۶]. منشور داو مورد استفاده به دلیل داشتن مراکز رنگی عمل سویچ Q انفعالی را نیز به عهده دارد. تک مد سازی تشدیدگر حلقوی تک سویه با دو سنجه درون کاواکی با ضخامت‌های مختلف مورد مطالعه قرار

۱. Spatial hole burning

۲. Optical isolator

۳. Reciprocal rotator

۴. Polarizer

۵. Beam splitter

۶. Dove prism

صحیحی است. نسبت فاصله قله‌های مجاور به پهنای نوار عبوری ضریب ظرافت<sup>۱</sup>، نام دارد و با رابطه (۴) تعریف می‌شود

$$F = \frac{\Delta\nu}{\delta\nu} \quad (4)$$

با در نظر گرفتن جدایی بسامدی در سنجه  $\Delta\nu = \frac{c}{\nu d}$ ، پهنای

باند عبوری  $\delta\nu = \frac{c}{\nu dF}$  می‌باشد. در این صورت به کمک رابطه

(۳)، ضریب ظرافت با رابطه (۵) داده می‌شود [۱]

$$F = \frac{\pi}{\nu \sin^{-1} \left( \nu + \frac{\nu R}{(1-R)^2} \right)^{-1/2}} \quad (5)$$

برای  $R > 0.5$  ضریب ظرافت با تقریب مناسب برابر است با

$$F \approx \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$$

باشند. به دلیل حضور سنجه‌ها آستانه نوسان نوسانگر افزایش

می‌یابد و بسیاری از مدهای نوسانی پدید نمی‌آیند. با توجه به

بستگی  $\varphi$  به زاویه میان عمود بر سطح سنجه و محور نوری

تشدیدگر، می‌توان عبوردهی سنجه‌ها را برای دستیابی به تک مد

طولی تنظیم نمود. شکل ۱ چگونگی تک مد سازی با استفاده از

یک سنجه را نشان می‌دهد، که در آن تنها مدهایی به نوسان در

می‌آیند که بهره محیط فعال  $g(\nu, \nu_0)$  برای آنها حد بالاتر از

آستانه نوسان قرار دارد. برای احراز این شرط بسامد مد طولی

نوسانگر باید در داخل یکی از قله‌های عبوردهی سنجه واقع

شود که در آنجا بهره کافی موجود است. در شکل ۱ تنها مد

نوسانی که در مرکز نمایه بهره محیط فعال با بسامد  $\nu = \nu_0$

واقع شده است از بهره کافی برخوردار است و سایر مدهای

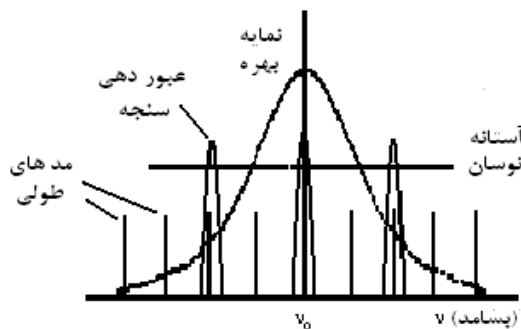
طولی به نوسان در نمی‌آیند.

در پژوهش حاضر به منظور دستیابی به نوسان تک مد لیزر از

یک نوسانگر حلقوی تک سویه مثلثی استفاده شده است،

(شکل ۲). محیط فعال نوسانگر بلور Nd:YAG به طول ۱۰۰ mm

و قطر ۸ mm و سه آینه تمام بازتابان در طول موج nm و یک



شکل ۱. استفاده از سنجه داخل تشدیدگر برای ایجاد تک مد طولی نوسانگر لیزر.

جلوگیری به عمل آورد [۷]. برای حذف اثر چاله سوز فضایی

بایستی از تشکیل امواج ایستاده جلوگیری شود. در نوسانگرهای

حلقوی تک سویه امواج ایستاده تشکیل نمی‌شود و امواج رونده

به وجود می‌آید، موج رونده با اشباع یکنواخت محیط بهره،

باعث حذف اثر چاله سوز فضایی می‌شود. همچنین اشباع

یکنواخت بهره محیط فعال منجر به افزایش توان خروجی در

مقایسه با عملکرد مشابه در تشدیدگر خطی می‌گردد [۷ و ۸].

یکی از روش‌های مؤثر کاهش مدهای نوسانی استفاده از

سنجه فابری- پرو درون تشدیدگر است. غالباً سنجه از یک

قطعه اپتیکی با دو سطح کاملاً موازی با ضریب بازتابش معلوم

تشکیل شده است. سنجه وسیله مناسبی برای تنظیم طول موج،

کنترل پهنای خط و اندازه‌گیری پهنای خط لیزر است. توان

عبوری،  $\frac{I_T}{I_{in}}$  و بازتابی  $\frac{I_R}{I_{in}}$  برای یک سنجه فابری- پرو با

رابطه (۳) داده می‌شود [۱]

$$\frac{I_T}{I_{in}} = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R \sin^2(\varphi/2)} \quad (3)$$

$$\frac{I_R}{I_{in}} = 1 - \frac{I_T}{I_{in}}$$

که در آن  $R$  ضریب بازتاب شدت برای هر سطح سنجه،

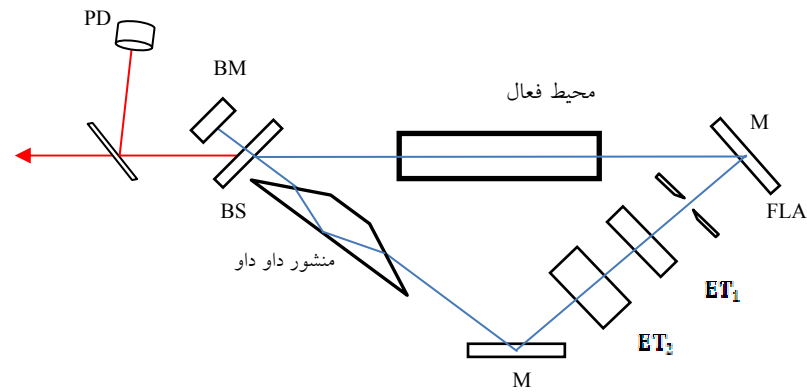
$\varphi = 2kd \cos(\theta)$  اختلاف فاز ناشی از اختلاف راه میان

باریکه‌های عبوری و  $I_{in}$  شدت ورودی است.  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  عدد

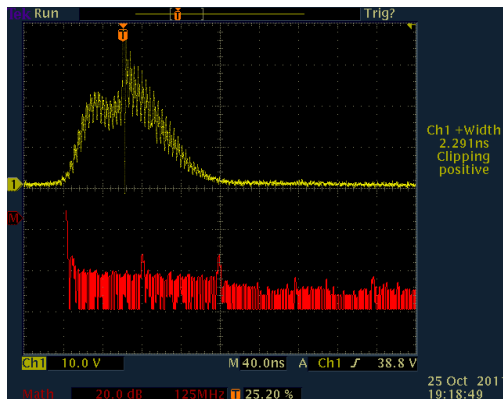
موج،  $\lambda$  طول موج،  $d$  ضخامت سنجه و  $\theta$  زاویه شکست پرتو

نسبت به عمود بر سطح پس از ورود به سنجه است. پیشینه

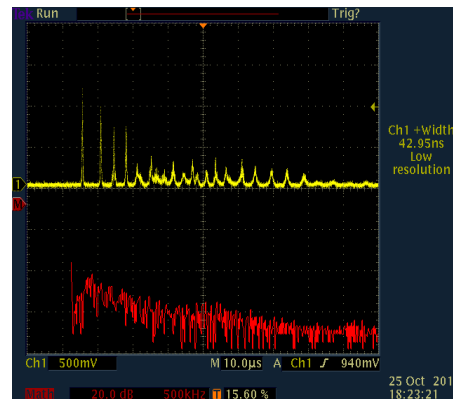
عبوردهی به ازای  $\varphi = 2m\pi$  رخ می‌دهد که  $m$  صفر یا عدد



شکل ۲. آرایش اپتیکی نوسانگر حلقوی تک مد. M آینه‌های تمام بازتابان، BM آینه تمام بازتابان انتهایی برای تک سویه کردن تشدیدگر، BS آینه شکافنده باریکه با ضریب بازتاب  $50\%$ ، FLA روزنه به قطر  $2.5\text{ mm}$ ،  $ET_1$  سنجه با ضخامت  $6\text{ mm}$  و ضریب بازتاب  $R=0.36$  و  $ET_2$  سنجه با ضخامت  $15\text{ mm}$  و ضریب بازتاب  $R=0.65$ ، PD فوتودیود.



(ب)



(الف)

شکل ۳. (الف) رفتار زمانی تپ خروجی از نوسانگر حلقوی مثلثی تک سویه قبل از قرار گرفتن منشور داو و بدون انجام عمل سویچ Q. (ب) بعد از حضور منشور و عمل سویچ Q تپ با انرژی دمش  $25\text{ J}$  و انرژی خروجی میانگین  $48\text{ mJ}$ . در هر دو تصویر تبدیل فوریه در ذیل نمودار شدت آمده است. در نمودار (ب) حضور بیش از ۷ مد طولی در تحلیل فوریه به وضوح قابل مشاهده است.

با توجه به پهنای طیفی کل بهره  $\Delta\nu_{\text{gain}} = 120\text{ GHz}$  برای محیط فعال  $[\text{Nd}:\text{YAG}]$ ، و فاصله مدهای طولی  $\Delta\nu_{\text{ring}} = \frac{c}{L} = 240\text{ MHz}$ ، به نرخ دمش محیط فعال و تلفات وابسته است و می‌تواند در حد  $\Delta\nu_{\text{gain}} / \Delta\nu_{\text{ring}} = 500$  باشد. طول قاعده منشور داو مورد استفاده  $d_{\text{dov}} = 5/8\text{ cm}$  و تقریباً موازی با محور اپتیکی قرار دارد. به دلیل خاصیت چرخش تصویر منشور داو، نمایه لکه خروجی بسیار یکنواخت است [۶].

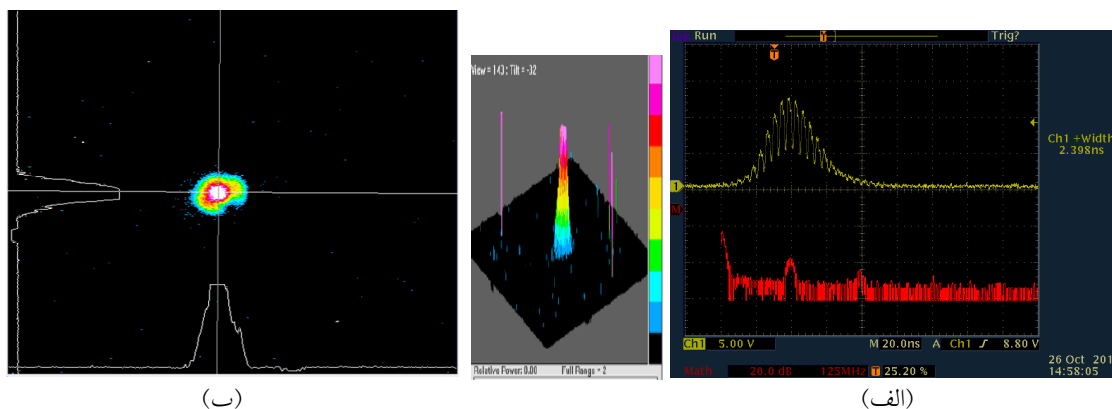
در شکل ۳ رفتار زمانی تپ خروجی قبل و بعد از قرار گرفتن منشور داو، با و بدون حضور روزنه و سنجه‌ها، نشان داده شده است. در هر دو حالت میانگین انرژی خروجی  $48$

آینه جلو (BS) با ضریب بازتاب  $50\%$  است که با زاویه  $50^\circ$  درجه نسبت به محور اپتیکی قرار گرفته‌اند. برای کاستن از پهنای زمانی تپ سویچ Q، طول هندسی نوسانگر تا حداقل ممکن  $L \approx 1250\text{ mm}$  کاهش داده شده است. آینه انتهایی (BM) برای تک سویه کردن و جلوگیری از اتلاف در تشدیدگر استفاده شده است.

تعداد مدهای طولی نوسانگر حلقوی که بدون کنترل بر روی مدهای نوسانی می‌توانند به آستانه نوسان برسند،

۱. Beam splitter

۲. Back mirror



(ب)

(الف)

شکل ۴. (الف) رفتار زمانی شدت تپ و فرآیند جفت شدگی میان چند مد طولی. تبدیل فوریه تپ در ذیل نمودار شدت آمده است. (ب) نمایه باریکه خروجی از لیزر با انرژی خروجی ۱۲/۸ mJ و انرژی دمش ۲۲/۵ ژول، روزنه FLA با قطر ۲/۵ میلی متر درون تشدیدگر قرار دارد.

مورد نظر نیست. در شکل ۵ (الف) نمودار تغییرات انرژی دمش نوسانگر بر حسب انرژی خروجی از نوسانگر ترسیم شده است، تغییر شیب ایجاد شد در نمودار انرژی ناشی از دو بار اشباع سویچ Q است. در شکل ۵ (ب) بستگی انرژی به تعداد مدهای طولی، به کمک قابلیت تبدیل فوریه سریع اسپیلوسکوپ برای شدت در حالتی که سویچ Q یک بار به اشباع رسیده و بدون حضور سنجها ترسیم شده است.

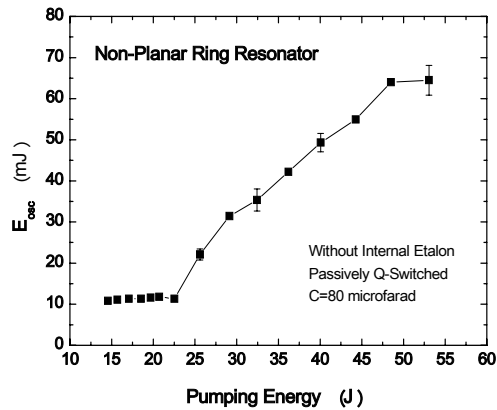
برای کنترل و انتخاب مد طولی نوسانگر از سنج‌های فابری-پرو (ET) استفاده می‌شود [۱-۳]. برای کاستن از مدهای طولی نوسانگر حلقوی از یک سنج به ضخامت ۶ mm و ضریب بازتاب  $R_1 = 0.36$  در طول موج ۱۰۶۴ nm استفاده گردید. در این حال تعداد مدهای طولی میان ۱ تا ۴ مد متغیر است و حالت پایداری نشان نمی‌دهد. برای تک مد سازی از سنج دوم با ضخامت ۱۵ mm و ضریب بازتاب  $R_2 = 0.65$  در طول موج ۱۰۶۴ nm استفاده شد. لازم به ذکر است که اگر تنها از سنج دوم استفاده شود باز هم حالت تک مد پایدار به دست نمی‌آید و تعداد مدهایی که به آستانه نوسان می‌رسند بین ۱ تا ۳ مد متغیر می‌باشند. به دلیل ضخامت زیاد سنج دوم، پس از قرار دادن آن لازم است تشدیدگر مجدداً تنظیم شود. در تنظیم زاویه میان عمود بر سطح سنج و محور نوری تشدیدگر سعی بر آن است تا بیشترین پایداری مدی و انرژی و کمترین پهنای زمانی تپ به دست آید.

میلی ژول است. رفتار زمانی تپ به کمک یک فوتودایود، (PD)، با زمان پاسخ ۰/۱ ns و اسپیلوسکوپ سریع تکترونیکس TDS3052B با پهنای نوار ۵۰۰ MHz ثبت شده است.

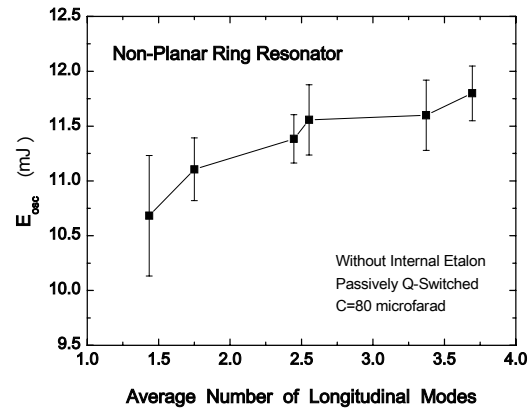
تبدیل فوریه تپ خروجی به دست آمده به کمک قابلیت‌های اسپیلوسکوپ، تعداد تقریبی مدهای موجود در تپ را مشخص می‌نماید. فاصله بسامدی قابل مشاهده میان دو مد طولی در این شکل ۲۵۰ MHz است که با  $\Delta\nu_{ring} = 240$  MHz سازگار است. برای نوسان لیزر بر روی مد عرضی پایه TEM<sub>۰۰</sub> از روزنه محدود کننده میدان FLA<sup>۱</sup> به قطر ۲/۵ mm درون نوسانگر استفاده شد. نمایه فضایی لکه خروجی و رفتار زمانی تپ خروجی در شکل ۴ نشان داده شده است. با دقت در نمودار تبدیل فوریه شکل‌های ۳ و ۴ به خوبی دیده می‌شود که تعداد مدهای ایجاد شده در تشدیدگر به دلیل افزایش تلفات کمتر شده است.

هنگامی که درون کاواک تنها از منشور داو و روزنه استفاده شده و سنج، درون نوسانگر قرار ندارد، و برای ظرفیت خازن ۸۰ میکرو فاراد و نرخ تکرار ۲۰ ثانیه، با افزایش انرژی دمش تا حدود ۲۲ ژول، تعداد مدهای نوسانی افزایش می‌یابد اما انرژی خروجی از نوسانگر تقریباً ثابت و در بازه ۱۰-۱۲ mJ قرار دارد. با افزایش بیشتر انرژی دمش، سویچ Q انفعالی دو بار عمل کرده و دو تپ در خروجی به دست می‌آید و بدین ترتیب انرژی نوسانگر افزایش می‌یابد که در پژوهش حاضر

۱. Field Limiting Aperture



(ب)

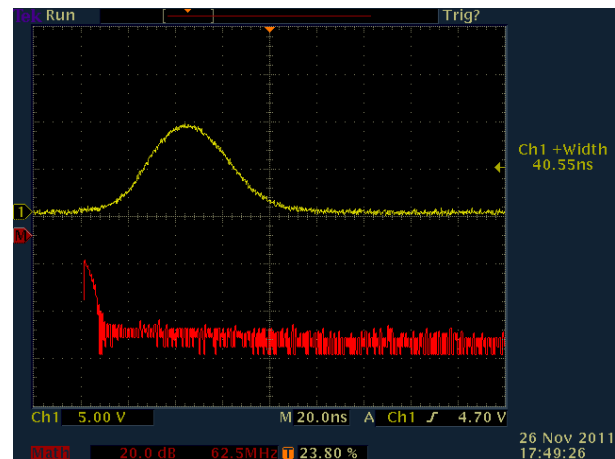


(الف)

شکل ۵. الف) بستگی انرژی خروجی نوسانگر به انرژی دمش. ب) انرژی خروجی نوسانگر برای تک تپ سویچ Q به میانگین تعداد مدهای طولی که به کمک تبدیل فوریه سریع شدت به دست آمده است.

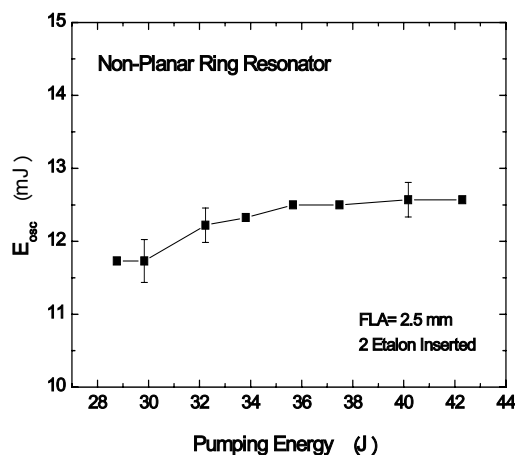
کاهش دادیم تا با شارژ کامل خازن در فاصله میان دو تخلیه، پایداری انرژی خروجی بیشتری به دست آید. نکته‌ای که لازم است بدان توجه شود تغییر پهنای تپ خروجی با زاویه سنجه نازک است که می‌تواند سبب به نوسان در آمدن یک یا چند مد طولی شود. از این روی تنظیم دقیق زاویه سنجه از اهمیت فراوانی برخوردار است، این نکته در مرجع ۸ نیز گزارش شده است.

به دلیل اتلاف انرژی در اثر حضور سنجه در تشدیدگر تعداد عبورها برای رسیدن به آستانه نوسان، و در نتیجه پهنای تپ خروجی تا حدود ۴۰ نانوثانیه افزایش می‌یابد. در این حال انرژی نوسانگر ۱۰/۸ تا ۱۱/۸ میلی ژول است. پایداری کامل در یکنواختی رفتار زمانی تپ خروجی و مشاهده تنها یک مد در تبدیل فوریه سریع شدت، نشان از تک مد شدن تپ خروجی لیزر دارد، (شکل ۶). برای شکل ۷ (الف) دو سنجه با ضخامت‌های ۶ و ۱۵ میلی‌متری برای تک مد سازی درون کاواک قرار دارند، ظرفیت خازن ۴۰ میکروفاراد و تکرار تپ به فاصله ۲۰ ثانیه صورت می‌گیرد. نمودار انرژی خروجی به ازای مقادیر متفاوت انرژی دمش پایداری مناسبی را از خود نشان می‌دهد. در شکل ۷ (ب) بستگی پهنای تپ خروجی لیزر با افزایش انرژی دمش نشان داده شده است. پهنای تپ با افزایش

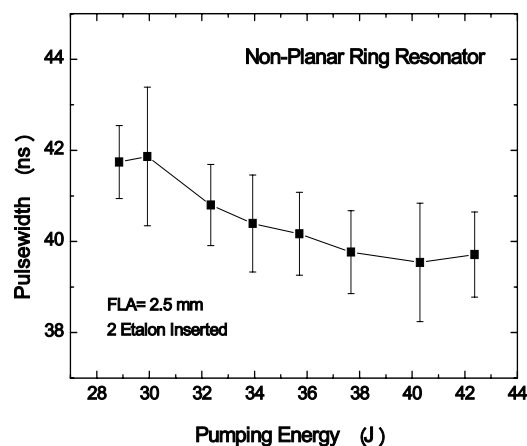


شکل ۶. نمونه‌ای از تک مد لیزر با انرژی ۱۱ mJ و انرژی دمش ۳۱ ژول با یکنواختی، عدم زنش مدی برای رفتار زمانی تپ و تکرار پذیری کامل. تحلیل فوریه تپ (نمودار پایین) حاکی از نوسان یک مدی طولی تشدیدگر است.

بیشینه انرژی خروجی پایدار از نوسانگر درحالی که نوسانگر روی یک مد نوسان کند، در حالتی به دست آمد که سنجه نازک در زاویه ۵/۷ درجه و سنجه ضخیم تقریباً در زاویه صفر درجه نسبت به محور اپتیکی قرارگیرد به صورتی که از بازتاب‌های ناخواسته میان سطوح سنجه و آینه‌های لیزر و امکان ایجاد مشدد دوم در مشدد اصلی جلوگیری به عمل آید. همچنین ظرفیت خازن لامپ درخش را از ۸۰ به ۴۰ میکروفاراد



(ب)



(الف)

شکل ۷. رفتار انرژی و پهنای تپ خروجی از نوسانگر حلقوی ناهم سطح تک مد بر حسب انرژی دمش. (الف) انرژی خروجی از نوسانگر لیزر و پایداری آن نسبت به تغییرات انرژی دمش. (ب) تغییرات پهنای زمانی تپ خروجی از نوسانگر نسبت به افزایش انرژی دمش. ظرفیت خازن  $40 \mu F$  قطر روزنه درونی تشدیدگر  $2/5$  میلی متر و نرخ تکرار تپ  $0.05$  هرتز می باشد. دو سنجه در داخل نوسانگر قرار دارد.

جدول ۱. گستره انرژی خروجی، پهنای طیفی و میانگین تعداد مدهای مشاهده شده برای نوسانگر در مراحل مختلف تکمیل فرآیند تک مد سازی.

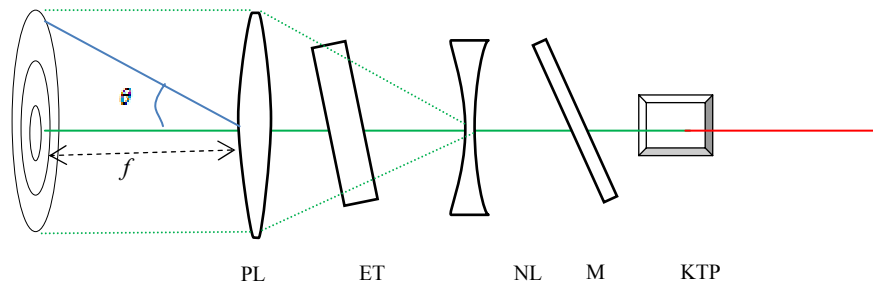
شرایط عمل	ظرفیت خازن ( $\mu F$ )	انرژی دمش (J)	انرژی خروجی نوسانگر (mJ)	پهنای تپ (ns)	میانگین تعداد مدهای مشاهده شده
۱ یا ۲ تپ سویچ Q	۸۰	۲۰ - ۳۲	۴۷ - ۱۰۱	۷۹ - ۱۰۰	بیش از ۵
قرار دادن روزنه $2/5$ میلی متری	۸۰	۱۴ - ۵۳	۱۱ - ۷۳	۲۸ - ۳۸	۴-۱
	۸۰	۲۹ - ۲۰	۱۲,۹	۲۷ - ۳۰	۴-۳
قرار دادن سنجه نازک	۸۰	۲۶ - ۳۶	۹-۹,۵	۲۵ - ۲۸	۳-۲
	۴۰	۲۶ - ۳۷	۱۱-۱۲,۶	۲۶ - ۲۸	۲-۱
قرار دادن سنجه ضخیم	۸۰	۲۹ - ۴۰	۹,۲ - ۹,۴	۳۲ - ۳۳	۲-۱
	۴۰	۲۹ - ۴۲	۱۱,۷-۱۲,۶	۴۰ - ۴۲	۱

سنجه فابری-پرو بیرون کاواکی بهره گرفته شد [۱، ۳]. در این بخش به کمک روابط موجود میان الگوی تداخلی فابری-پرو و روابط میان قطر و فاصله حلقه های الگوی تداخلی به بررسی ساختار مدی تپ لیزر می پردازیم. در شکل ۸ چیدمان مناسب برای اندازه گیری پهنای بینایی لیزر به کمک تداخل سنج فابری-پرو نشان داده شده است. با عبور باریکه لیزر از عدسی منفی (NL) پرتو لیزر باز شده و به صورت یک مخروط به سطح سنجه برخورد می کند. الگوی حلقه های فابری-پرو با عبور باریکه از یک عدسی همگرا با فاصله کانونی بلند، بعد از کانون

انرژی دمش به دلیل رسیدن به آستانه نوسان به ازای تعداد گردش های کمتر فوتون حدود ۲ نانوثانیه کاهش می یابد، در این حال تپ لیزر همچنان تک مد است.

در جدول ۱ مقادیر به دست آمده برای انرژی خروجی از نوسانگر و همچنین پهنای زمانی و میانگین تعداد مدهای به دست آمده توسط تبدیل فوریه شدت برای تپ سویچ Q آمده است.

به منظور تعیین ساختار مدی و اندازه گیری توزیع طیفی، از یک



شکل ۸. چیدمان برای مطالعه ساختار مدی نوسانگر لیزر. اجزا به ترتیب عبارتند از: بلور KTP برای تولید هماهنگ دوم لیزر، M آینه تمام بازتابان در طول موج ۱۰۶۴ nm، عدسی واگرا با فاصله کانونی  $f_N = -5$  cm، سنجه فابری-پرو، PL عدسی همگرا با فاصله کانونی  $f_N = +40$  cm.

فابری-پرو از یک بلور KTP برای تولید هماهنگ دوم لیزر Nd:YAG در طول موج ۵۳۲nm استفاده به عمل آمد و مانده باریکه عبوری از بلور در طول موج اصلی ۱۰۶۴ نانومتر برای جلوگیری از ترکیب الگوهای تداخلی بر روی دو طول موج به کمک آینه M حذف شد. برای جلوگیری از بازگشت باریکه ورودی به درون نوسانگر، لازم است تا آینه M با زاویه کوچکی نسبت به محور اپتیکی قرار گیرد. برای مشاهده فریزهای تداخلی، هماهنگ دوم لیزر از یک عدسی منفی، (NL) با فاصله کانونی  $f = -5$  cm عبور داده شد تا باریکه به صورت مخروط بر سطح سنجه بتابد [۱ و ۳]. اما به دلیل آنکه پرتو لیزر تحت زوایای متفاوتی به سطح سنجه برخورد می‌کند، لذا حلقه‌های ناشی از یک فرکانس بر روی یکدیگر منطبق نمی‌شوند، برای جبران این اثر از یک عدسی مثبت (PL) با فاصله کانونی ۴۰ سانتی‌متر استفاده شد تا باریکه خروجی موازی با محور اپتیکی شود و فریزهای فابری-پرو در نزدیکی کانون عدسی و دورتر از آن به وضوح مشاهده گردد [۱۲]. برای ثبت فریزهای فابری-پرو از یک دوربین تحلیل کننده باریکه لیزر مدل WincamD استفاده به عمل آمد.

جهت دست یابی به الگوهای تداخلی با وضوح بالا، دو سنجه با ضخامت‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به دست آمده، با یکدیگر مقایسه شدند، همچنین اثر بازه طیفی آزاد و ضریب ظرافت سنجه در ضخامت و فاصله حلقه‌های فابری-پرو مشاهده گردید. دو سنجه،  $ET_A$  با ضخامت ۱۵ میلی‌متر و سنجه  $ET_B$ ، به ضخامت ۶ میلی‌متر را در چیدمان شکل مذکور قرار دادیم. لازم به ذکر است که بازتابندگی سطوح

بر روی پرده و یا CCD قابل مشاهده است. اگر  $D_p$  قطر  $p$  امین حلقه فابری-پرو از الگوی تداخلی ایجاد شده توسط عدسی با فاصله کانونی  $f$  بر روی CCD باشد، بستگی طول موج و قطر حلقه برای یک تداخل سنجه فابری-پرو به ضخامت  $d$  از رابطه (۶) به دست می‌آید [۳، ۱۰]

$$D_p^2 = \frac{4n'\lambda f^2}{n^2 d} (p-1+\varepsilon) \quad (6)$$

که در آن  $n'$  ضریب شکست محیط،  $n$  ضریب شکست سنجه و  $\varepsilon$  عدد کسری است که مرتبه مرکزی را به عدد صحیح تبدیل می‌کند. با استفاده از توزیع شدت می‌توان پهنای خط را به صورت تابعی از قطر فریزها در مراتب مختلف از رابطه (۷) به دست آورد [۱۱]

$$\delta v = \Delta v \left[ \frac{D_{\lambda b}^2 - D_{\lambda a}^2}{D_{\lambda a}^2 - D_{\lambda a}^2} \right] \quad (7)$$

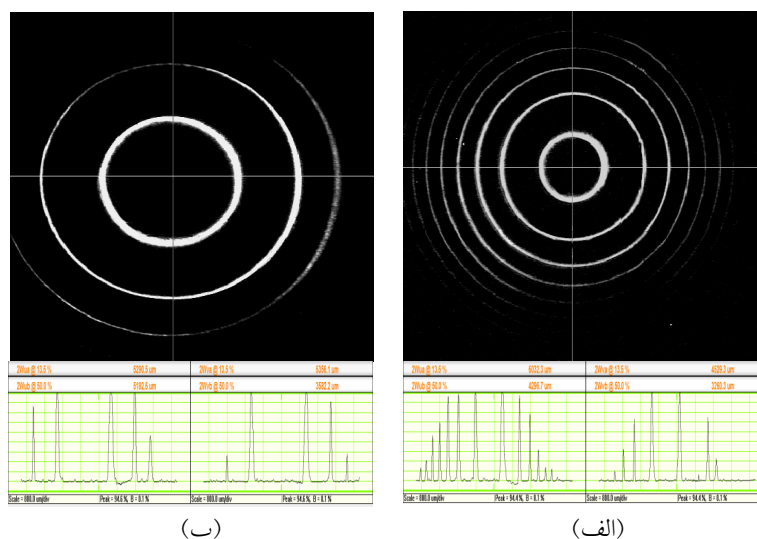
که در آن  $\Delta v$  بازه طیفی آزاد سنجه،  $D$  قطر فریزها و اعداد ۲ و ۱ نشان دهنده دو مرتبه تداخلی نزدیک به هم هستند.  $a$  و  $b$  دو نقطه‌ای را که پهنای فرکانسی  $\delta v$  برای آن اندازه‌گیری شده است، نشان می‌دهند [۷]. اگر الگوی تداخلی ایجاد شده ناشی از چند مد با مرتبه‌های متفاوت باشد، می‌توان جدایی عدد موج دو مد مجاور را مطابق رابطه (۸) به دست آورد

$$\delta v = \Delta v \left[ \frac{D_{p+1}^2 - d_{p+1}^2}{D_{p+1}^2 - D_p^2} \right], \quad (8)$$

که در آن  $D_p$  و  $D_{p+1}$  قطر حلقه  $p$  و  $p+1$  ام یک مد، و  $d_{p+1}$  قطر  $p+1$  ام مد دیگری است [۱۰].

تحلیل ساختار مدی تشدیدگر حلقوی به کمک یک سنجه فابری-پرو در بیرون نوسانگر انجام شد. برای مشاهده حلقه‌های





شکل ۹. الف) الگوی تداخلی فابری- پرو حاصل از سنجه  $ET_A$  با ضخامت ۱۵ mm. (ب) فریزهای فابری- پرو مربوط به  $ET_B$  با ضخامت ۶ mm، انرژی دمش ۲۹ ژول، ظرفیت خازن  $40 \mu F$  و فاصله زمانی میان دو تپ لیزر  $20$  ناینه است.

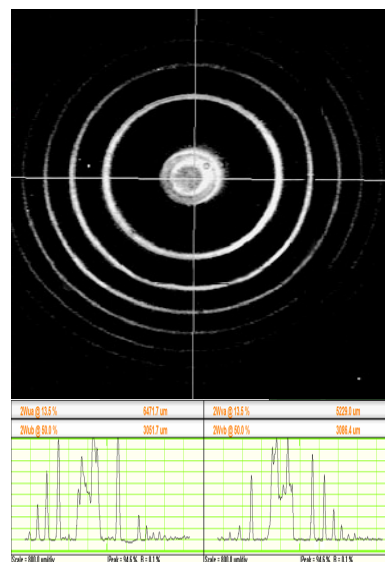
شد. پهنای بینایی عبوردهی سنجه  $\delta\nu$  نیز به کمک رابطه (۴) به ضریب ظرافت و گستره بینایی آزاد ارتباط دارد:

$$F_A = F_B = 29/8, \quad (9)$$

$$\Delta\nu_A = 6/66 \text{ GHz}, \quad \Delta\nu_B = 16/67 \text{ GHz}, \quad (10)$$

$$\delta\nu_A = 0/223 \text{ GHz}, \quad \delta\nu_B = 0/559 \text{ GHz}. \quad (11)$$

حلقه‌های فابری- پرو به دست آمده در طول موج  $532$  نانومتر در شکل ۹ نشان داده شده‌است. فاصله حلقه‌ها گستره طیفی آزاد  $\Delta\nu$  و ضخامت حلقه‌ها  $\delta\nu$ ، پهنای فرکانسی را نشان می‌دهد. الگوهای به دست آمده از هر دو سنجه باریک و تیز و دارای شدتی گوسی است، بدین معنی که این نقوش ناشی از تک مد طولی‌اند. هنگامی که در الگو تداخلی حلقه‌های روشن به صورت دو یا چند حلقه بسیار نزدیک به یکدیگر باشند و یا از شدت حلقه‌ها کاسته و دوباره افزایش یابد نشان از چند مدی بودن باریکه خروجی دارد که این حالت را به عنوان نمونه برای هنگامی که یکی از سنجه‌های درون نوسانگر را برداشته و نوسانگر از تک مد بودن خارج شده است، در شکل ۱۰ نشان داده‌ایم. شکل ۹ (الف) فریزهای تداخلی ناشی از  $ET_A$  با ضخامت ۱۵ میلی‌متر و شکل ۹ (ب) فریزهای تداخلی ناشی از  $ET_B$  را با ضخامت ۶ میلی‌متر نشان می‌دهد. همچنین نمودار تغییرات شدت عبوری از سنجه در راستای محور مختصات



شکل ۱۰. الگوی تداخلی سنجه فابری- پرو A هنگامی که تنها یک سنجه  $6 \text{ mm}$  داخل نوسانگر قرار دارد. حلقه مرکزی و حلقه اول به خوبی دو مد نوسانی، و نوسانات نمودار شدت ترکیب دو مد را نشان می‌دهند، انرژی دمش  $31$  ژول و انرژی خروجی نوسانگر  $11$  میلی‌ژول است.

سنجه‌ها بر روی طول موج  $532$  نانومتر  $90\%$  و در طول موج  $1064$  نانومتر  $75\%$  است. برای محاسبه ضریب ظرافت در طول موج  $532$  نانومتر از رابطه (۵) و تقریب  $\frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$ ، و برای گستره بینایی آزاد سنجه از رابطه  $\Delta\nu = \frac{c}{2n_{ET}d}$  و  $n_{ET} \approx 1/5$  استفاده

حلقه‌های به وجود آمده از حالت تیز و باریک خارج می‌شود، شکل ۱۰. به دلیل عدم پایداری کامل ساختار مدی خروجی نوسانگر، الگوی به دست آمده در یک تجربه ساختاری اندکی متفاوت با تجربه دیگر از خود نشان می‌دهد.

به کمک ترکیبی از یک سنجه، ضخیم با نمایه گذردهی باریک و گستره طیفی آزاد کوچک، و یک سنجه نازک با نمایه گذردهی پهن و گستره طیفی آزاد گسترده‌تر و تنظیم دقیق سنجه‌ها در یک تشدیدگر حلقوی ناهم‌سطح تک سویه می‌توان به ساختار تک مد طولی با پایداری مناسب برای نوسانگر سوئیچ Q دست یافت. در این مقاله با مطالعه ساختار فرکانسی و تعداد مدهای طولی خروجی از نوسانگر لیزر به کمک تبدیل فوریه سریع و همچنین سازگاری نتایج آن با الگوی تداخلی فابری-پرو تپ لیزر، چگونگی ایجاد تک مد طولی و یا محدود کردن تعداد مدهای خروجی از یک نوسانگر لیزر مورد بررسی قرار گرفته است. تکرار پذیری خوب و پهنای طیفی باریک نوسانگر از نقاط قوت آرایش تجربی مورد مطالعه به شمار می‌آید. پایداری طیفی و پایداری انرژی خروجی نوسانگر به همراه کیفیت بالای فضایی باریکه خروجی لیزر به ویژگی‌های خاص تشدیدگر حلقوی با آرایش هندسی نا هم سطح باز می‌گردد که آن را برای بسیاری کاربردها با ثبات نسبتاً بالای بینایی مناسب می‌سازد.

$x, y$  با مقیاس  $800 \mu m$  به ترتیب در سمت چپ و راست در زیر هر شکل آمده است. انرژی دمش ۲۹ ژول، ظرفیت خازن  $40 \mu F$  و فاصله زمانی میان دو تپ ۲۰ ثانیه است. با استفاده از رابطه (۱۰) و اطلاعات به دست آمده از شکل ۹، نتایج زیر برای دو سنجه مطابق با رابطه‌های (۱۲) و (۱۳) به دست می‌آید

$$\delta v_A = \Delta v_A \left[ \frac{D_{yb}^2 - D_{ya}^2}{D_{ya}^2 - D_{ya}^2} \right] = 6/66 \left[ \frac{1299^2 - 1039^2}{2571^2 - 1039^2} \right] \quad (12)$$

$$= 0.732 \text{ GHz},$$

$$\delta v_B = \Delta v_B \left[ \frac{D_{yb}^2 - D_{ya}^2}{D_{ya}^2 - D_{ya}^2} \right] \quad (13)$$

$$= 16/67 \left[ \frac{2455^2 - 2207^2}{4337^2 - 2207^2} \right] = 1.38 \text{ GHz}.$$

میانگین پهنای فرکانسی برای سنجه A به ازای انرژی دمش ۲۹ ژول  $\delta v_A = 0.813 \pm 0.056$  و برای سنجه B به ازای انرژی دمش ۲۹ تا ۳۹ ژول برابر با  $\delta v_B = 1.80 \pm 0.2736$  است.

از آنجایی که هر دو سطح سنجه‌ها دارای لایه نشانی بازتابی هستند، لذا در اندازه‌گیری طیف بازتابی سنجه‌ها در طول موج ۵۳۲ نانومتر عدم دقت وجود دارد، همچنین اندازه‌گیری نیم پهنای شدت عبوری و قطر حلقه‌ها به دلیل تغییرات شدت میان حلقه‌ها با خطا همراه است که سبب ایجاد اختلاف در نتایج تجربی و نظری (روابط ۹ تا ۱۱) شده است.

هنگامی که تنها یک سنجه ۶ میلی‌متری درون کواک قرار دارد، ساختار حلقه‌های فابری-پرو تغییر نموده و شدت

## مراجع

1. W Koechner, "Solid-State Laser Engineering" 6<sup>th</sup> ed. Springer (2006).
2. N Hodgson and H Weber "Optical Resonators", Springer (1997).
3. M Born and E Wolf "Principle of Optics", Cambridge (2003).
4. W A Clarkson, A B Neilson, and D C Hanna, *IEEE J. Quantum Electron* **32**, 2 (1996) 311.
5. M Hercher, M Young, and C B Smoyer, *J. Appl. Phys.* **36** (1965) 3351.
6. امیر حسین فرهد و سربه فتحی، کنفرانس فیزیک ایران، دانشگاه بوعلی سینا همدان (۱۳۸۹).
7. W Demteroder, "Laser Spectroscopy Basic Concepts
8. ا. سوولتو، "اصول لیزر" ترجمه اکبر حریری، مرکز نشر دانشگاهی، تهران (۱۳۸۱).
9. امیر حسین فرهد، مهروز نصیری و مصطفی ترکاشوند، کنفرانس فیزیک ایران، کاشان (۱۳۸۷).
10. N Singh and H S Vora, *Optics and Laser Technology*, **39** (2007) 733.
11. S Lavi, E Miron, and I Smilanski. *Opt. Commun.* **27** (1978) 7.
12. H Fujiwara, *Opt. Commun.* **28** (1979) 291.