

## بهینه سازی بازتاب آینه جفت کننده خروجی در طول موج سیگنال نوسانگر پارامتری نوری کلید زنی Q شده درون کواکی مشدد یگانه

صاحب صمیمی، علیرضا کشاورز و محسن حاتمی

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده - بازتاب آینه جفت کننده خروجی در طول موج سیگنال یک عامل بسیار مهم در طراحی نوسانگرهای پارامتری نوری است. برای بازتابش آینه جفت کننده خروجی در طول موج سیگنال یک مقدار بهینه وجود دارد. در این تحقیق با استفاده از تحلیل عددی معادلات آهنگ تحت تقریب موج تخت، بازتابش بهینه آینه جفت کننده خروجی در طول موج سیگنال محاسبه شده است. مقدار بدست آمده با استفاده از این روش ۷۹ درصد است که با مقدار بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی که ۸۰ درصد گزارش شده است، در توافق خوبی است.

کلید واژه- بازتاب، نوسانگر پارامتری نوری، مشدد.

## Optimization of Output Coupler Reflectivity at Signal Wavelength Q-Switched Intracavity Single Resonator Optical Parametric Oscillator

Saheb Samimi, Alireza Keshavarz, and Mohsen Hattami

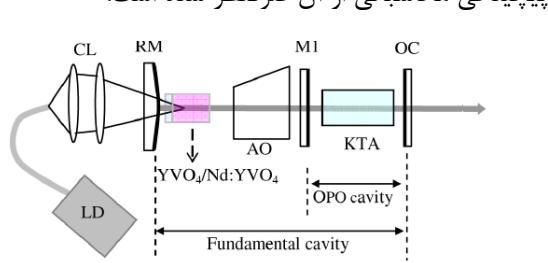
Department of Physics, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

**Abstract-** Output coupler reflectivity at signal wavelength is an important parameter to design optical parametric oscillators. There is an optimum value for output coupler reflectivity at signal wavelength. In this research it has been calculated the optimum value of output coupler reflectivity at signal wavelength using numerical analysis of rate equation under plane wave approximation. The calculated value is 79% which is in good agreement with experimental results, which is reported 80%.

**Keywords:** Reflectivity, Optical Parametric Oscillator, Resonator.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت [www.opsi.ir](http://www.opsi.ir) قابل دسترسی باشد.

## ۱ - مقدمه



شکل ۱ : چیدمان آزمایشگاهی معرفی شده در مرجع [۴]

معادلات آهنگ برای چیدمان شکل ۱ بصورت زیر بدست می آیند:

$$\frac{d\varphi_l(t)}{dt} = c\sigma \frac{l_{lc}}{l_f} n(t)\varphi_l(t) - c\sigma_{NL} \frac{l_{NL}}{l_f} \varphi_s(t)\varphi_l(t) - \frac{\varphi_l(t)}{\tau_l} \quad (1)$$

$$\frac{d\varphi_s(t)}{dt} = \frac{l_{NL}}{l_{OPO}} c\sigma_{NL} \varphi_s(t)\varphi_l(t) - \frac{\varphi_l(t)}{\tau_l} \quad (2)$$

$$\frac{dn(t)}{dt} = \gamma c\sigma \varphi_l(t) \quad (3)$$

در معادلات (۱) تا (۳)،  $l_{lc}$ ،  $l_f$ ،  $l_{NL}$  و  $l_{OPO}$  به ترتیب طول بلور لیزری، بلور غیر خطی، طول اپتیکی کاواک لیزری و نوسانگر پارامتری نوری هستند.  $c$  سرعت نور در خلا و  $\sigma$  سطح مقطع گسیل القایی می باشند.  $\omega_p$  فرکانس پمپ محیط بهره را نشان می دهد.  $\tau_{l,s}$  به ترتیب طول عمر فوتون های لیزر و سیگنال و  $\sigma_{NL}$  سطح مقطع برهمنشی پارامتری هستند که از روابط زیر بدست می آیند:

$$\tau_j = \frac{t_{ij}}{L_j + \ln\left(\frac{1}{R_j}\right)} \quad \text{with } j = l, s \quad (4)$$

$$\sigma_{NL} = \frac{\hbar\omega_l\omega_s\omega_{id}d_{eff}^2l_{NL}}{\varepsilon_0c^2n_l^2n_s^2n_{id}} \left(1 - \frac{\alpha_{id}l_{NL}}{3}\right) \quad (5)$$

که در آن ها  $t_{rl}$  و  $t_{rs}$  زمان رفت برگشت فوتون های لیزر و سیگنال،  $L_l$  و  $L_s$  افت ذاتی کاواک لیزری و نوسانگر پارامتری نوری،  $R_l$  و  $R_s$  بازتابش آینه جفت کننده خروجی در طول موج های به ترتیب لیزر و

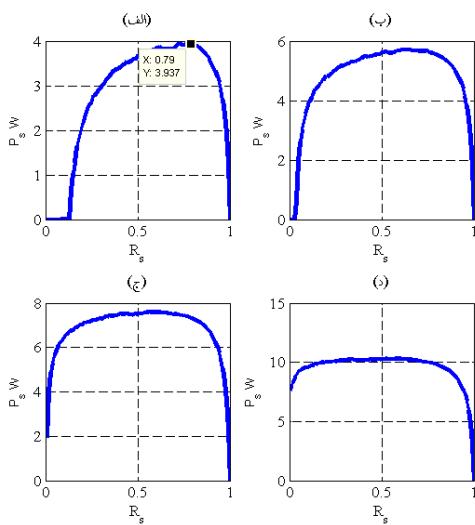
نوسانگرهای پارامتری نوری ابزارهای مناسبی برای تولید نور لیزر با طول موج قابل تنظیم در ناحیه طیف فروسرخ هستند [۲، ۱]. یکی از مدل های نظری موفق در توصیف رفتار نوسانگرهای پارامتری نوری استفاده از معادلات آهنگ است [۳].

بازتاب آینه جفت کننده خروجی در طول موج پمپ لیزری تقریباً کامل است، چون پرتوهای پمپ لیزری نیازی به خارج شدن ندارند و هر چه بازتاب آینه جفت کننده خروجی در این طول موج بیشتر باشد توان خروجی موج سیگنال افزایش می یابد. اما بازتاب آینه جفت کننده در طول موج سیگنال نباید ۱۰۰٪ باشد، زیرا باید قسمتی از موج سیگنال بعنوان توان خروجی از کاواک خارج شود. از یک طرف چنانچه بازتابش آینه جفت کننده خروجی بالا باشد فوتون ها کمتری از کاواک خارج می شوند، در نتیجه توان خروجی موج سیگنال کاهش می یابد. از طرف دیگر با کاهش بازتابش این آینه افت کاواک نوسانگر پارامتری افزایش می یابد در نتیجه موج سیگنال به اندازه کافی تقویت نمی شود که سبب کاهش توان خروجی موج سیگنال می شود. بنابر این می توان یک مقدار بهینه را برای بازتابش آینه جفت کننده خروجی در طول موج سیگنال، انتظار داشت.

در این تحقیق با استفاده از حل معادلات آهنگ به محاسبه بازتابش آینه جفت کننده خروجی بهینه پرداخته شده است. برای حل معادلات آهنگ فرض شده است توزیع فضایی موج پمپ محیط لیزری، توزیع یکنواخت داشته باشد.

## ۲ - مدل نظری

شکل ۱ نمودار چیدمان آزمایشگاهی معرفی شده در مرجع [۴] است. تمام گزارهای از حالت برانگیخته به حالت پایه اتم های لیزری منجر به تابش فوتون نمی شود. چون تعدادی از فوتون های تابشی در لیزر های حالت جامد توسط یون ها مجاور طی برهمنشی چند قطبی- چند قطبی بازجذب می شوند. به این اثر، اثر تبدیل انرژی بالاسو یا ETU گفته می شود. اثر ETU در مرجع [۵] بررسی شده است که در این تحقیق برای جلوگیری از



شکل ۲: نمودار توان خروجی بر حسب ضریب بازتاب آینه خروجی به ازای شاع پرتو پمپ محیط بهره لیزری (الف)  $w_p = 320 \mu m$  (ب)  $w_p = 220 \mu m$  (د)  $w_p = 250 \mu m$  (ج)  $w_p = 280 \mu m$

$w_s$  شاع پرتو های سیگنال است. شکل ۲ توان متوسط خروجی موج سیگنال بر حسب ضریب بازتاب آینه جفت کننده خروجی در طول موج سیگنال نشان می دهد. برای بررسی درستی نتایج حاصل از این مدل، شکل ۲-الف مربوط به چیدمان مرجع [۴] است. مقدار بدست آمده از این مدل همانطور که در شکل مشخص شده است ۷۹٪ است که با مقدار انتخاب شده برای این چیدمان که ۸۰٪ گزارش شده در توافق است.

همچنین مشاهده می شود با کاهش شاع پرتو پمپ محیط بهره لیزری توان متوسط خروجی موج سیگنال افزایش می یابد این به دلیل آنست که با کاهش شاع پرتو پمپ محیط بهره شدت آن افزایش می یابد و طبق معادله (۸) آهنگ پمپ جمعیت معکوس در محیط بهره لیزری افزایش می یابد.

با توجه به شکل ۲ می توان نتیجه گرفت که با کاهش شاع پرتو محیط بهره لیزری منحنی توان متوسط خروجی موج سیگنال بر حسب بازتاب آینه جفت کننده خروجی تخت تر می شود. این پدیده نقش مهمی را در بهینه سازی هزینه ساخت آینه ها ایفا می کند.

سیگنال هستند.  $d_{eff}$  ضریب غیر خطی موثر،  $\omega_s$  و  $\omega_{id}$  به ترتیب فرکانس های فوتون های لیزری، سیگنال و ایدلر و  $n_s$ ،  $n_l$  و  $n_{id}$  ضریب شکست متوسط مربوط به آن ها هستند.  $\alpha_{id}$  ضریب جذب خطی محیط غیر خطی در طول موج ایدل است. برای حل معادلات (۱) تا (۳) نیاز به محاسبه جمعیت معکوس اولیه تولید شده توسط پمپ محیط بهره می باشد.

قبل از کلید زنی  $Q$  به دلیل افت بالای کاواک فوتون های لیزر اصلی فقط توسط گسیل خود بخودی تولید می شوند بنابر این قبل از کلید زنی  $Q$  معادله آهنگ برای جمعیت معکوس بصورت زیر است [۶]:

$$\frac{dn_i(t)}{dt} = R_p - \frac{n_i(t)}{\tau} \quad (6)$$

که در آن  $n_i(t)$  جمعیت معکوس قبل از کلید،  $R_p$  آهنگ پمپ جمعیت معکوس و  $\tau$  طول عمر گسیل خود به خودی هستند. با حل معادله (۶) جمعیت معکوس اولیه بصورت زیر بدست می آید:

$$n_i(1/f) = n(0) = f_a R_p \tau \left[ 1 - \exp\left(\frac{1}{f \tau}\right) \right] \quad (7)$$

در معادله (۷)،  $f$  نرخ تکرار و  $f_a$  ضریب بولتزمن برای تراز بالایی اتم های محیط لیزری هستند.  $R_p$  با توجه به رابطه زیر به توان پمپ محیط بهره لیزری وابسته است:

$$R_p = \frac{P_p \left[ 1 - \exp(-\alpha l_{lc}) \right]}{\hbar \omega_p \frac{\pi w_p^2}{2} l_{lc}} \quad (8)$$

در معادله (۸)،  $P_p$  توان پمپ محیط بهره لیزری و  $\alpha$  ضریب جذب محیط بهره لیزری در فرکانس موج پمپ محیط بهره هستند.  $w_p$  شاع پرتو پمپ محیط بهره، لیزری است.

### ۳- محاسبات عددی

با حل معادلات (۵) تا (۷) چگالی فوتون های سیگنال بدست می آید که با توجه به رابطه زیر می توان توان متوسط موج سیگنال را بدست آورد [۷]:

$$P_s = f \frac{\hbar \omega_s c \pi w_s^2}{2} \ln \left( \frac{1}{R_s} \right) \int_0^\infty \varphi_s(t) dt \quad (9)$$

Ling-An, "Mid-infrared generation based on a periodically poled LiNbO<sub>3</sub> optical parametric oscillator", Chinese Physics, 10(4) 12, 2004.

[3] T. Debuisschert, J. Raffy, J.-P. Pocholle, M. Papuchon, "Intracavity optical parametric oscillator: study of the dynamics in pulsed regime", JOSA B, 13 (1996) 1569-1587.

[4] F. Bai, Q. Wang, Z. Liu, X. Zhang, X. Wan, W. Lan, G. Jin, X. Tao, Y. Sun, "Theoretical and experimental studies on output characteristics of an intracavity KTA OPO", Optics express, 20 (2012) 807-815.

[5] A. Keshavarz, S. Samimi, "The influence of energy transfer upconversion on Q-switched single resonator optical parametric oscillator", Laser Physics, 25 (2015) 095401.

[6] W. Koechner, "Solid-state laser engineering", Springer, 2013.

[7] Y. Huang, Y. Huang, C. Cho, Y. Chen, "Influence of output coupling on the performance of a passively Q-switched Nd: YAG laser with intracavity optical parametric oscillator", Optics express, 21 (2013) 7583-7589.

[8] S. Samimi, A. Keshavarz, "Investigation of thermal induced diffraction loss on Q-switched intracavity optical parametric oscillator", Optics Communications, 359 (2016) 184-188.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق سعی در برآورد بازتابش آینه جفت کننده خروجی شده است. برای تحقق این امر ابتدا معادلات آهنگ تحت تقریب موج تخت حل شده اند و پس از آن با رسم منحنی توان متوسط خروجی موج سیگنال بر حسب بازتابش آینه جفت خروجی در طول موج سیگنال مقدار بهینه بازتابش آینه جفت کننده خروجی در طول موج سیگنال بدست می‌آید. مقدار بدست آمده از این مدل ۷۹٪ است که با مقدار گزارش شده تجربی که ۸۰٪ است در توافق است.

با توجه به محاسبات انجام شده در این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت با کاهش شعاع پرتو پمپ محیط بهره، منحنی توان متوسط خروجی موج سیگنال بر حسب بازتابش آینه جفت کننده خروجی در طول موج سیگنال تخت تر می‌شود که نقش مهمی را در انتخاب ضریب بازتاب و کاهش هزینه ساخت آینه جفت کننده خروجی ایفا می‌کند.

توان متوسط بدست آمده از این مدل در بیشینه خود برای چیدمان مرجع [۴] مقدار  $W_{\text{avg}} = 3/93$  است. دلیل بیشتر از مقدار بدست آمده تجربی  $W_{\text{exp}} = 3/77$  این تفاوت اینست که اثر ETU که باعث کاهش تولید جمعیت معکوس اولیه می‌شود در نظر گرفته نشده است. همچنین از اثرات گرمایی صرفنظر شده است.

از تحلیل عددی معادلات آهنگ تحت تقریب موج تخت می‌توان نتیجه گرفت با کاهش شعاع پرتو پمپ محیط بهره لیزری توان متوسط خروجی موج سیگنال افزایش پیدا می‌کند. اما در واقع برای پهنهای پرتو پمپ محیط بهره نیز یک مقدار بهینه وجود دارد. چگونگی محاسبه این شعاع بهینه در مراجع [۵, ۶] مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

#### مراجع

- [1] D. Xin, S. Quan, C. Na, Y. Xuan-Yi, W. Rui, Z. Heng, W. Wu-Qi, W. Peng, Y. Jian-Quan, "High efficiency continuous-wave tunable signal output of an intracavity singly resonant optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate", Chinese Physics B, 18 (2009) 4314.
- [2] L. Xue-Chun, K. Yu-Peng, Z. Ying, Z. Jie, Y. Ai-Yun, B. Yong, S. Zhi-Pei, C. Da-Fu, L. Rui-Ning, W.