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

# بررسی نرخ تکرار بهینه برای نوسانگر پارامتری نوری درون کاواکی کلید زنی شده Q با مشدد یگانه

صاحب صمیمی، علیرضا کشاورز و محسن حاتمی

گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز

چکیده – در این مقاله نرخ تکرار برای نوسانگر پارامتری نوری درون کاواکی پمپ از انتها(***IOPO***) مورد مطالعه قرار گرفته است و نرخ تکراری که به ازاء آن توان خروجی و به تبع آن بازده نوسانگر بیشینه می شود معرفی می گردد. از معادلات نرخ برای شبیه سازی استفاده شده و معادلات حاکم برای نوسانگر پارامتری نوری ***KTA*** و با لیزر پمپ ***$Nd:YVO_4$*** توسط نرم افزار متلب بصورت عددی حل شده و از نتایج آن برای مطالعه عوامل مؤثر بر نرخ تکرار بهینه استفاده گردیده است. برای توان ورودی ۲۵/۹ وات و ضریب بازتاب آینه جفت کننده ۰/۹ فرکانس بهینه ***kHz*** ۴۹ بدست آمده است که با دقت ۲ درصد با داده های تجربی تفاوت دارد وتوان خروجی موج سیگنال ۳/۷۷ وات می باشد که با مقدار تجربی در توافق است.

کلید واژه- جمعیت معکوس، لیزر، ضریب غیر خطی مؤثر، نرخ تکرار.

# Investigation of optimum repetition rate for Q-switched Single Resonator Intracavity Optical Parametric Oscillator

Saheb Samimi, Alireza Keshavarz, and Mohsen Hatami

Department of Physics, Shiraz University of Technology

**Abstract- In this paper the repetition rate for intracavity Q-switched optical parametric oscillators has been studied and optimum repetition rate at which output power and output efficiency become maximum, has been obtained. The rate equations model has been used for simulation. ODE system for KTA SRO-IOPO pumped with End-diode pump $Nd:YVO_4$ laser, has been solved numerically. Solution of this ODE system has been used to obtain optimize repetition rate. . For input power of 25.9 W, the optimum repetition rate from theory was obtained at 49 kHz which differs 2% from the experimental value and output power was calculated 3.77 W which is in good agreement with experimental results.**

**Keywords: inversion population, laser, effective non-linear coefficient, repetition rate**



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

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-02 ]

۱- مقدمه

منابع لیزری که طول موج خروجی آن ها در محدوده طیف فروسرخ میانی باشد بدلیل کاربردهای فراوان و چشم ایمن بودن آن ها توجه زیادی را در زمینه تحقیات لیزر به خود جلب کرده است. یکی از روش های مهم در تولید لیزر در این طیف استفاده از تبدیل طول موجی به وسیله نوسانگر پارامتری نوری است. در این روش از خروجی یک لیزر اولیه مانند Nd:YAG بعنوان پمپ که یک بلور غیر خطی مناسب در کاواک لیزری قرار دارد استفاده می شود.

یکی از کمیت های بسیار مهم در مطالعه نوسانگر پارامتری نوری توان و بازده تبدیل خروجی است. این کمیت به عوامل زیادی همچون شکل هندسی مشدد لیزر، نوع بلور غیر خطی مورد استفاده، شرط تطابق فاز، نرخ تکرار و ... بستگی دارد.

در این مقاله تطابق فاز کامل در زاویه غیر بحرانی در نظرگرفته شده است چرا که در این حالت برون روی به حداقل خود می رسد و برای سادگی از تقریب موج تخت استفاده شده است.

یکی از مدل های موفق در مطالعه نوسانگرهای پارامتری نوری درون کاواکی با تشدید یگانه استفاده از دستگاه معادلات نرخ می باشد. این مدل توسط T. Debuisschert در سال ۱۹۹۶ ارائه شد[۴]. این مدل دستگاه معادلاتی را شامل تحول زمانی جمعیت معکوس در بلور لیزری اصلی، تحول زمانی چگالی فوتون های لیزر اصلی یا پمپ و تحول زمانی فوتون های سیگنال را پیشنهاد می کند. با حل این معادلات تحول زمانی نوسانگر پارامتری نوری درون کاواکی یگانه بدست می آید.

در اینجا با حل معادلات نرخ به مطالعه تاثیر نرخ تکرار بر روی توان خروجی موج سیگنال پرداخته شده و عوامل مؤثر بر نرخ تکرار بهینه مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مدل نظری

در این بخش به معرفی مدل نظری برای نوسانگرهای پارامتری نوری یگانه درون کاواکی کلید زنیQ شده پرداخته شده است. بر اساس مدل معادلات نرخ [۳] دستگاه معادلات زیر برای تحول زمانی جمعیت معکوس، چگالی فوتون های پمپ و چگالی فوتون های سیگنال بدست می آیند:

$$\begin{aligned}
\frac{dn(t)}{dt} &= -\gamma c\sigma n(t)\varphi_p(t) - \frac{n(t)}{\tau} \\
\frac{d\varphi_p(t)}{dt} &= \sigma c \frac{l_{lc}}{l_f} n(t)\varphi_p(t) \\
&\quad -g\frac{l_{nl}}{l_f}\varphi_p(t)\varphi_s(t) - \frac{\varphi_p(t)}{\tau_l} \\
\frac{d\varphi_s(t)}{dt} &= g\frac{l_{nl}}{l_{opo}}\varphi_p(t)\varphi_s(t) - \frac{\varphi_s}{\tau_s}
\end{aligned} \qquad (۱)$$

که در آن $n(t), \varphi_p$ و $\varphi_s$ به ترتیب جمعیت معکوس، چگالی فوتون های پمپ و چگالی فوتون های سیگنال هستند. σ و γ بترتیب سطح مقطع تابش القایی و ضریب مربوط به تبهگنی تراز بالایی لیزر، $c$ سرعت نور در خلا، τ نیمه عمر تراز بالایی لیزر، $l_{lc}$ و $l_{nl}$ طول میله لیزری و بلور غیر خطی، $l_f$ و $l_{opo}$ به ترتیب طول نوری کاواک لیزری و کاواک غیر خطی هستند.

$\tau_l$ و $\tau_s$ بترتیب نیمه عمر فوتون کاواک لیزری و کاواک غیر خطی می باشند که از رابطه زیر به دست می آیند:

$$\begin{aligned}
\tau_l &= \frac{t_{rl}}{L_l + \ln(\frac{1}{R_l})} \\
\tau_s &= \frac{t_{rs}}{L_s + \ln(\frac{1}{Rs})}
\end{aligned} \qquad (۲)$$

$t_{rl}$ و $t_{rs}$ زمان، $L_l$ و $L_s$ افت ذاتی کاواک در یک رفت و برگشت کامل به ترتیب برای فوتون های لیزر پمپ و موج سیگنال می باشند، $R_l$ و $R_s$ هم بترتیب ضریب بازتاب آینه جفت کننده خروجی برای موج پمپ و سیگنال می باشند.

ضریب بهره پارامتری $g$ از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$g = \frac{\bar{h}\omega_p\omega_s\omega_{id}d_{eff}^2 l_{nl}}{\varepsilon_0 c n_p^2 n_s^2 n_{id}}(1-\frac{\alpha_{id}}{3}) \qquad (۳)$$

که در آن $\omega_s, \omega_p$ و $\omega_{id}$ به ترتیب فرکانس امواج پمپ،



[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-02 ]

سیگنال و سرگردان هستند، $n_s, n_p$ و $n_{id}$ ضریب شکست بلور غیر خطی به ترتیب برای پمپ، سیگنال و سرگردان می باشند، $d_{eff}$ ضریب غیر خطی مؤثر است و $\alpha_{id}$ ضریب جذب بلور غیر خطی در طول موج سرگردان می باشد.

برای حل دستگاه معادلات (۱) به مقادیر اولیه برای جمعیت معکوس، چگالی فوتون های سیگنال و پمپ نیاز است.مقدار اولیه چگالی فوتون های پمپ و سیگنال از گسیل خود به خودی ناشی می شود و می توان مقدار بسیار کمی را برای آن در نظر گرفت و یا از تابع توزیع پلانک در تعادل گرمایی در دمای اتاق آن را محاسبه کرد. جمعیت معکوس اولیه با رابطه زیر به توان دایود پمپ و نرخ تکرار مربوط می شود[۲]:

$$n(0) = f_a R_{in} \tau [1 - \exp(-\frac{1}{f_p \tau})] \qquad (۴)$$

که در آن $f_a$ ضریب توزیع بولتزمن برای تراز بالایی لیزر است و $R_{in}$ اهنگ تولید جمعیت معکوس است که از رابطه زیر بدست می آید[۶]:

$$R_{in} = \frac{P_{in}[1 - \exp(-\alpha_{LD} l_{lc})}{\bar{h}\omega_{LD} \frac{\pi w_{LD}^2}{2} l_{lc}} \qquad (۵)$$

در رابطه بالا $P_{in}$، $\alpha_{LD}$، $\omega_{LD}$ و $w_{LD}$ به ترتیب توان ورودی دایود، جذب میله لیزری در طول موج دایود، فرکانس گسیلی دایود و شعاع پرتو دایود می باشند.

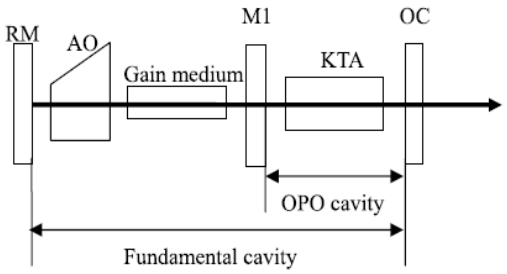
پس از حل دستگاه معادلات (۱) و بدست آوردن چگالی فوتون های سیگنال می توان توان خروجی متوسط را از رابطه زیر محاسبه کرد[۳].

$$P_s = f_p \frac{\bar{h}\omega_s c \pi w_s^2}{2} \ln(\frac{1}{R_s}) \int_0^t \varphi_s(t) dt \qquad (۴)$$

در اینجا $f_p$ نرخ تکرار و $w_s$ شعاع باریکه سیگنال هستند.

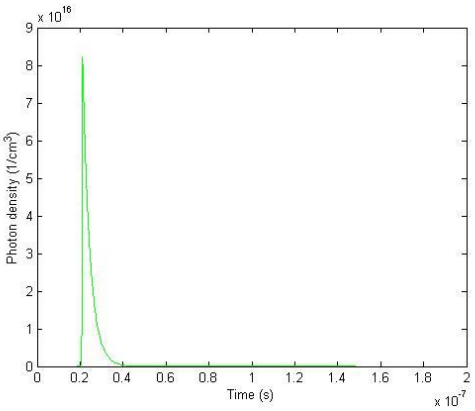
## ۳- حل عددی معادلات و شبیه سازی

در این بخش به حل عددی معادلات بوسیله نرم افزار متلب پرداخته شده است. از آنجا که به مقادیر عددی نیاز است چیدمان آزمایشگاهی مطابق مرجع[۶] را در نظر گرفته شده است و دستگاه معادلات را برای آن حل کرده و نتایج آن با مقادیر بدست آمده از آزمایش مقایسه خواهند شد.




شکل(۱): شکل چیدمان آزمایش [۶]

با حل دستگاه معادلات آهنگ با مقادیر اولیه مناسب معرفی شده در بخش ۲ می توان چگالی فوتون های سیگنال را بصورت تابعی از زمان بدست آورد. شکل پالس سیگنال خروجی درشکل (۲) به ازاء $R_s = 0.9$ ترسیم شده است.




شکل(۲): شکل پالس سیگنال به ازاء $R_s$=0.9

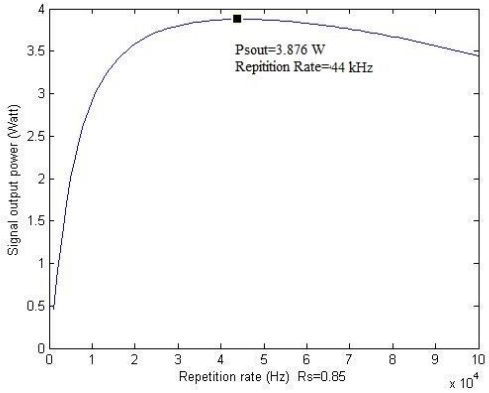
به ازاء توان ورودی ۲۵/۹ وات توان ورودی برای آزمایش مرجع [۶] مقدار بهینه kHz ۴۹ برای نرخ تکرار بدست آمده است. این مقدار برای چیدمان مرجع [۶] بصورت تجربی kHz ۵۰ اندازه گیری شده است که با مقدار بدست آمده از نظریه ۲ درصد اختلاف دارد که در شکل (ب-۳) مشخص شده است.

در شکل (۳) توان خروجی برحسب نرخ تکرار برای سه مقدار ضریب بازتاب آینه های جفت کننده

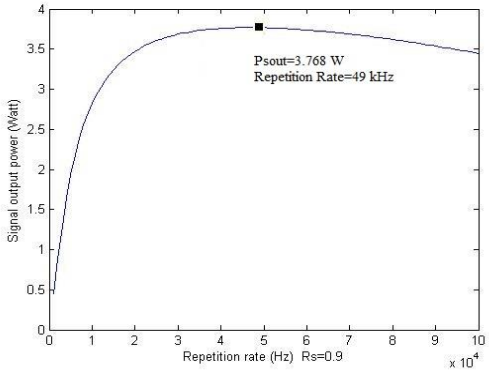


[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-02 ]

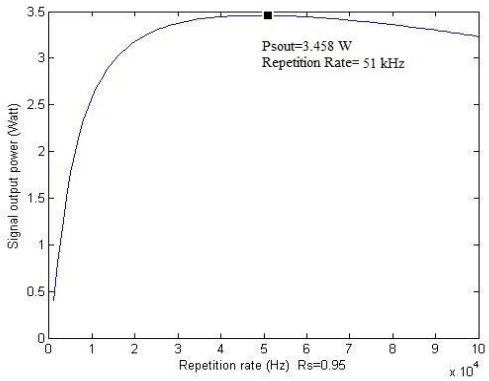
$R_s = 0.9, R_s = 0.85$ و $R_s = 0.95$ ترسیم شده است. با بررسی نمودار های ترسیم شده در شکل (۳) می توان نتیجه گرفت که یکی از عوامل مؤثر در نرخ تکرار بهینه ضریب بازتاب آینه های جفت کننده است.




(الف)




(ب)




(ج)

شکل(۳): نمودار توان خروجی سیگنال برحسب نرخ تکرار الف) Rs=0.85
ب) Rs=0.9 ج) Rs=0.95

نرخ تکرار بهینه نقش مهمی را در طراحی نوسانگرهای پارامتری نوری ایفا می کند. با استفاده از مدل ارائه شده در این مقاله می توان با داشتن ضریب بازتاب جفت کننده خروجی برای موج سیگنال، نرخ تکرار بهینه را بدست آورد.

## ۴- نتیجه گیری:

برای نوسانگر های پارامتری نوری کلیدزنی Q شده درون کاواکی یگانه، نرخ تکرار بهینه به ضریب بازتاب آینه جفت کننده وابسته است و هر چه ضریب بازتاب آینه جفت کننده افزایش یابد نرخ تکرار بهینه بسمت فرکانس های بالاتر انتقال پیدا خواهد کرد. از طرف دیگر با افزایش نرخ تکرار بهینه توان خروجی بیشینه کاهش پیدا خواهد کرد و دلیل آن از لحاظ فیزیکی اینست که با افزایش نرخ تکرار اتم های کمتری به تراز بالایی لیزر برانگیخته می شوند و در نتیجه جمعیت معکوس اولیه کمتری تولید می شود که عامل کم شدن توان لیزر پمپ است و به تبع آن توان پالس سیگنال هم کم می شود.

## مراجع

[1]Robert W. Boyd, *nonlinear optics*, AP, 3rd Edition
[2] Walter Koechner, *solid-state laser engineering*, Springer Series in OPTICAL SCIENCE
[3] Fen Bai, Qingpu Wang, Zhaojun Liu, Xingyu Zhang, Xuebin Wan, Weixia Lan, Guofan Jin, Xutang Tao and Youxuan Sun, *Theoretical and experimental studies on output characteristics of an intracavity KTA OPO*,**OPTICS EXPRESS.** 20 (2012) 807-815.
[4] T. Debuisshert, J. Raffy, P. Pocholle, and M. Papuchon, *Intracavity optical parametric oscillator: study of the dynamics in pulsed regim*, **Optical Society of America.** 13 (1996) 1569-1586.
[5] W. X. Lan, Q. P. Wang, Z. J. Liu, X. Y. Zhang, X. B. Wan, F. Bai, H. B. Shen, G. P. Lv, G. F. Jin, X. T. Tao, and Y. X. Sun, *Intracavity $KTiAsO_4$ Optical Parametric Oscillator Pumped by an Actively Q-Switched Nd:YAG laser*, **Laser Physics** (2012) 656-660.
[6] Guochao Li, Qingpu Wang, Fen Bai, Yesheng Gao, Guangjin Zheng, Yao Zhao, and Kunfeng Chen, *Optimum output coupling for a mid-infrared $KTiAsO_4$ optical parametric oscilaotr*, **Laser Phys**. 23 (2013) 1-5

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-02 ]