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 طیفی و بهینه‌سازی پرتودهی هماهنگ دوم و چهارم لیزر Nd:YAG

فاطمه فرمانی[۱]، پرویز پروین[۱*]، قاسم عزیزآبادی[۲] و علی بوالی[۱]

[۱]دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
[۲]آزمایشگاه لیزر، سازمان انرژی اتمی

**چکیده – در این پژوهش، تولید هماهنگ دوم و چهارم از باریکه‌ی ۱۰۶۴ نانومتر لیزر سوئیچ $Q$ یاگ، با استفاده از یک چیدمان مناسب، در شرایط بهینه‌ی تطابق فاز بررسی می‌شود. برای تأمین شرایط تطابق کامل فاز در دو هماهنگ، یک سکوی نگهداری بلور غیرخطی، با دقت تنظیم یک هزارم درجه، در دو زاویه‌ی فضایی و حرکت طولی با دقت میکرومتر در سه راستای $x$، $y$ و $z$ طراحی، ساخته و پس از آن به‌طور مناسب کالیبره شده است.**

کلید واژه- تطابق فاز، سکوی نگهداری بلور غیرخطی، هماهنگ چهارم، هماهنگ دوم.

# The Spectroscopy Study and Optimization of Second and Fourth Harmonics of Nd:YAG Laser

Fatemeh Farmani[1], Parviz Parvin[1*], Ghasem Azizabadi[2], and Ali Bavali[1]

[1]Energy Engineering and Physics Department, Amirkabir University of Technology
[2]Laser Laboratory, Atomic Energy Organization

Abstract- In this work second and fourth harmonics generation due to 1064 nm radiation of Nd:YAG Q-SW laser using a suitable setup in prefect phase-matching is investigated. A positioning mount for nonlinear crystal housing with one-thousandth degree precision in two spatial angles and one micrometer precision in x, y and z directions was designed, built and then accurately calibrated in order to providing prefect phase-matching conditions for two harmonics.

Keywords: Phase-matching, Positioning Mount for Nonlinear Crystal Housing, Fourth Harmonic, Second Harmonic.



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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]

## ۱- مقدمه

یک سال پس از ساخت نخستین لیزر جامد توسط میمن[1] و نخستین لیزر گازی توسط جوان، فرانکن[2] در سال ۱۹۶۱ هماهنگ دوم را کشف کرد [۱]. او و همکارانش توانستند نور فرابنفش را با دوبرابر بسامد باریکه‌ی لیزر یاقوت[3]، پس از عبور از بلور کوارتز آشکارسازی کنند [۲].

فرایند تولید هماهنگ دوم، در تشخیص دقیق ویژگی‌های سطحی قطعات اپتیکی کاربرد بسیار دارد. سطح ماده به‌وضوح فاقد تقارن معکوس[4] است و هماهنگ دوم می‌تواند در سطح ماده با هر نوع تقارنی، تولید شود. شدت و توزیع زاویه‌ای تولید هماهنگ سطحی، به‌شدت به ریخت‌شناسی[5] سطح و حضور ناخالصی روی آن، بستگی دارد. همچنین از تولید هماهنگ‌ها، برای افزایش قدرت‌تفکیک[6] عرضی و طولی در میکروسکوپی استفاده می‌شود. به این ترتیب، می‌توان نور با طول‌موج بلند به‌قدری که به مواد زیستی[7] آسیب نرساند را، به‌جای طول‌موج بسیار کوتاهتر به کار برد [۱]. لیزر سوئیچ Q یاگ همچنین، کاربردهای فراوانی در زمینه‌ی طیف‌سنجی LIBS [۳] و نیز تولید نانوذرات در محلول‌ها دارد [۴].

روش‌های متعددی برای افزایش بازدهی فرایند تولید هماهنگ وجود دارد. کاهش دما در بلور و در نتیجه یکنواخت شدن توزیع‌های دمایی، توان و بازده خروجی هماهنگ دوم تولیدشده با بلور KDP را افزایش می‌دهد [۵]. همچنین، در تولید هماهنگ دوم با لیزر پالسی یاگ با دوپ کردن بلور KTP با فلز سریم، با غلظت ppm ۹، توان خروجی ٪۱۵ بیش از بلور معمولی است [۶].

## ۲- مبانی نظری

پرتو لیزر با شدت میدان الکتریکی

$$E(t) = Ee^{-i\omega t} + \text{c.c.} \qquad (۱)$$

به بلوری با پذیرفتاری مرتبه‌ی دومِ غیرصفرِ $\chi^{(2)}$ برخورد می‌کند. قطبش غیرخطی ایجاد شده در بلور از رابطه‌ی $P^{(2)}(t) = \varepsilon_0\, \chi^{(2)}E^2(t)$، به دست می‌آید.

$$P^{(2)}(t) = 2\varepsilon_0\chi^{(2)}EE^* + (\varepsilon_0\chi^{(2)}E^2e^{-i2\omega t} + \text{c.c.}) \qquad (۲)$$

این قطبش متشکل از بسامد صفر در جمله‌ی اول و بسامد $2\omega$ در جمله‌ی دوم است، که تولید تابش با بسامد هماهنگ دوم را نشان می‌دهد [۱].

ساده‌ترین حالت دستیابی به فرایند تولید هماهنگ، مربوط به بلور تک‌محوری است [۱]. KDP (پتاسیم دی هیدروژن فسفات) بلور تک‌محوری منفی با تراز انتقال[8] بین نواحی فرابنفش و فروسرخِ نزدیک است [۷].

$\theta$، زاویه‌ی بین محور اپتیکی و k بردار انتشار نور قطبیده، با رابطه‌ی ۳ به ضریب‌شکست عادی $n_o$ مختص نور قطبیده‌ی عمود بر صفحه و $n_e(\theta)$ ضریب‌شکست نور قطبیده در صفحه، بستگی دارد.

$$\sin^2\theta = \frac{\dfrac{1}{n_O(\lambda)^2} - \dfrac{1}{n_O(\lambda/2)^2}}{\dfrac{1}{n_e(\lambda/2)^2} - \dfrac{1}{n_O(\lambda/2)^2}} \qquad (۳)$$

این عبارت همچنین، چگونگی جهت‌گیری بلور، برای برآورده شدن شرط تطابق فاز را نشان می‌دهد. تطابق فاز معمولا به یکی از دو روش تنظیم زاویه و تنظیم دما، انجام می‌شود [۱]، که در این پژوهش، روش تنظیم زاویه برای این کار برگزیده شده است.

با توجه به رابطه‌ی سلمایر[9]

$$n^2 = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C} + \frac{D}{\lambda^2 - E}، \qquad (۴)$$

استفاده از ضرایب A، B، C، D و E مخصوص بلور و همچنین رابطه‌ی ۳، زاویه‌ی تطابق فاز در فرایند تولید هماهنگ دوم برابر ۲۵/۷۲۱ درجه و در تولید هماهنگ چهارم، ۷۱/۳۱۹ درجه به دست آمد. به این ترتیب، زاویه‌ی $\theta$ برای برقراری شرط تطابق فاز در دو فرایند تولید

[1] Maiman
[2] Franken
[3] Ruby laser
[4] Inversion symmetry
[5] Morphology
[6] Resolution
[7] Biological materials
[8] Transmission band
[9] Sellmeier Coefficient



[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]

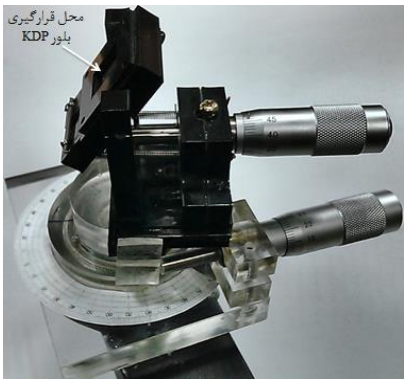
هماهنگ دوم و چهارم، تفاوت قابل‌توجهی با هم دارند.

## ۳- چیدمان و روش آزمایش

با توجه به تفاوت زاویه‌ی مناسب برای تحقق شرایط تطابق فاز در آزمایش‌های این پژوهش، استفاده از ابزاری برای تنظیم دقیق زوایای قرارگیری بلور، در برابر باریکه‌ی لیزر در هر بار آزمایش، ضروری است.

### ۳-۱- سکوی نگهداری بلور غیرخطی

در آزمایش‌های موردنظر، چرخش در جهت زوایای فضایی θ و φ، کافی است. به این منظور، سکوی نشان داده شده در شکل ۱، طراحی گردید و ساخته شد. با چرخش میکرومتر بالایی، قسمت سیاه‌رنگ سکو در جهت زاویه‌ی θ و با چرخش میکرومتر پایینی، قسمت بی‌رنگ آن در جهت زاویه‌ی φ دوران می‌کند.




شکل ۱: سکوی ساخته‌شده برای نگهداری و جهت‌دهی بلور KDP

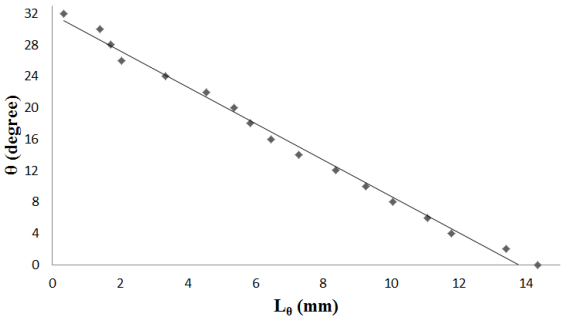
برای کالیبراسیون قسمت چرخان در جهت زاویه‌ی θ، چندین زاویه و عدد متناظر میکرومتر، به‌کمک نمودار شکل ۲ مطابقت داده شدند. سپس، با در نظر گرفتن بهترین خط عبوری ازین نقاط، معادله‌ای شامل عدد خوانده شده از روی میکرومتر، $L_\theta$ و زاویه‌ی قرارگیری بلور نسبت به محور عمود، θ، به‌دست می‌آید.

$$\theta = -2.317L_\theta + 31.901 \qquad (۵)$$

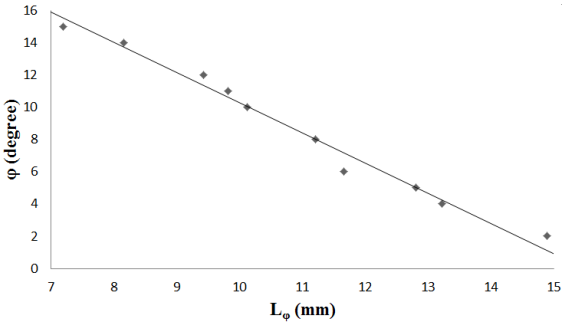
همچنین برای کالیبراسیون قسمت چرخان در جهت زاویه‌ی φ، رابطه‌ی

$$\varphi = -1.8744L_\varphi + 29.008 \qquad (۶)$$

که در آن $L_\varphi$ عدد خوانده‌شده از میکرومتر پایینی است، از داده‌های تجربی و به کمک شکل ۳، حاصل می‌شود.




شکل ۲: نمودار زاویه‌ی θ برحسب عدد خوانده‌شده از میکرومتر بالایی

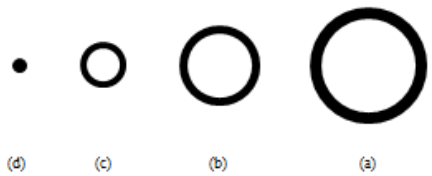



شکل ۳: نمودار زاویه‌ی φ برحسب عدد خوانده‌شده از میکرومتر پایینی

روابط ۵ و ۶، با دقت یک هزارم درجه، کمک بسزایی در افزایش توأمان سرعت و دقت اجرای آزمایش‌ها می‌کنند.

### ۳-۲- تولید هماهنگ‌های دوم و چهارم

باریکه‌ی فروسرخ با طول‌موج ۱۰۶۴ nm، از لیزر پالسی یاگ، به بلور KDP می‌تابد. با چرخاندن میکرومترهای متصل به سکوی نگهداری، سعی می‌شود شرایط تطابق فاز برای آزمایش مهیا شود، به‌طوری که کم‌کم شعاع دایره‌های سبزرنگ مشاهده‌شده روی پرده، کوچک‌تر شده و درنهایت به نقطه تبدیل می‌شوند.



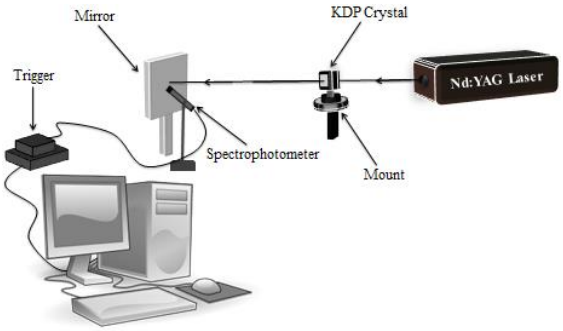

شکل ۴: روند ایجاد تطابق فاز. شکل‌ها به‌ترتیب از (a) تا (d) به سمت ایجاد تطابق فاز می‌روند. (به علت تابش شدید و پالسی بودن نور سبز، عکسبرداری به روش متداول ممکن نبود و طرحواره جایگزین شد.)

آنگاه با استفاده از طیف‌سنج نوری، نمودار شدت بر حسب طول‌موج باریکه‌ی خارج‌شده از بلور که ترکیبی از باریکه-



[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]

های فروسرخ و سبز است، روی صفحه‌ی نمایش دیده می‌شود. شکل ۵ طرحی از این چیدمان را نشان می‌دهد.

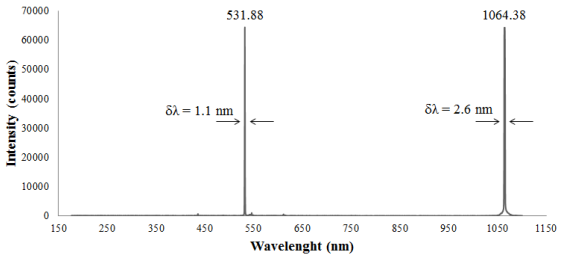



شکل ۵: طرحی از چیدمان آزمایش تولید هماهنگ

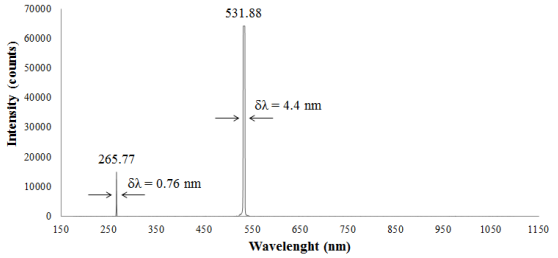
برای تولید هماهنگ چهارم، نور فرابنفش ۲۶۶ nm از تابش سبز ۵۳۲ nm، روند مشابه طی می‌شود.

## ۴- نتایج و بررسی آنها

پس از تنظیم دقیق زاویه‌ی متناظر با بهترین حالت برقراری شرایط تطابق فاز، نمودار شدت باریکه‌ی لیزر بر حسب طول‌موج برای فرایند تولید هماهنگ دوم و چهارم، به‌ترتیب در شکل ۶ و ۷ نمایش داده شده است.



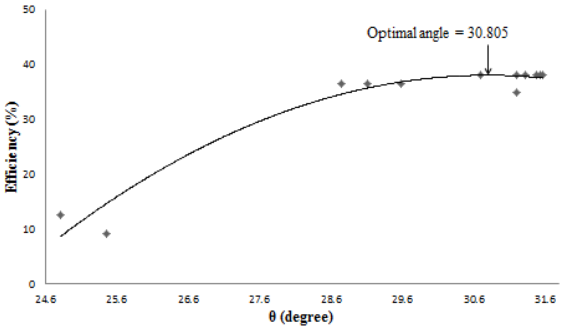

شکل ۶: نمودار شدت بر حسب طول‌موج، تولید هماهنگ دوم



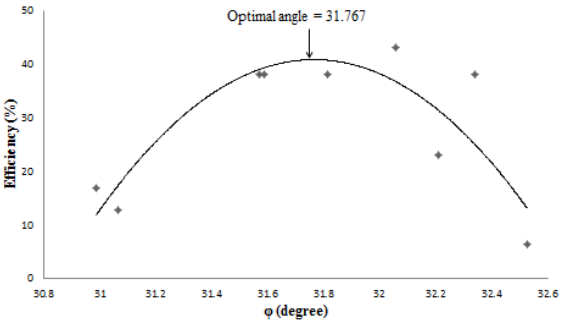

شکل ۷: نمودار شدت بر حسب طول‌موج، تولید هماهنگ چهارم

بخشی از تابش فروسرخ پس از برخورد به بلور از آن عبور می‌کند، بخشی به نور سبز، تبدیل می‌شود و بخش دیگر که اتلاف نام دارد، جذب یا بازتاب می‌شود.

با بهره‌گیری از نمودار ۶، تغییر زوایای بلور به‌طور جداگانه در دو حالت θ و φ، و همچنین استفاده از توان اندازه‌گیری‌شده برای خروجی لیزر در دو حالت حضور و عدم حضور بلور، نمودارهای ۷ و ۸ به دست می‌آیند.




شکل ۸: نمودار بازده بر حسب زاویه‌ی θ، تولید هماهنگ دوم




شکل ۹: نمودار بازده بر حسب زاویه‌ی φ، تولید هماهنگ دوم

قله‌ی هر نمودار، به علت دارا بودن بیشترین بازدهی فرایند، با زاویه‌ی تطابق فاز تجربی متناظر است. نقاط بهینه نمودارها مربوط به زاویه‌ی θ برابر ۳۰/۸۰۵ درجه و زاویه‌ی φ برابر ۳۱/۷۶۷ درجه هستند.

## مراجع


[1] R. W. Boyd, *Nonlinear Optics*, Third. Academic Press, 2008.

[2] P. A. Franken, A. E. Hill, C. W. Peters, and G. Weinreich, *Generation of optical harmonics*, **Physical Review Letter**, vol. 7, no. 4 (1961) 118–120.

[3] M. Jandaghi, P. Parvin, M. J. Torkamany, and J. Sabbaghzadeh, *Measurement of the composition change in Al5754 alloy during long pulsed Nd : YAG laser welding based on LIBS*, **Journal of Physics D: Applied Physics**, vol. 42, no. 20 (2009) 205301.

[4] a Bavali, P. Parvin, S. Z. Mortazavi, M. Mohammadian, and M. R. Mousavi Pour, *Red/blue spectral shifts of laser-induced fluorescence emission due to different nanoparticle suspensions in various dye solutions*, **Applied Optics**, vol. 53, no. 24 (2014) 5398–5409.

[5] W. Li, G. Feng, Q. Zhang, T. Zhang, and H. Liao, *Influence of the temperature distribution in KDP crystal on the second-harmonic generation*, vol. 7056, no. 2008 (2008) 70561G–8.

[6] N. Saito, M. Kato, K. Sakurai, Y. Murayama, M. Katsumata, and S. Wada, *Second Harmonic Generation of Nd:YAG Laser Using 9-ppm Cerium-Doped KTP*, **Advanced Solid-State Photonics** (2005) TuB24.

[7] F. Zernike and J. E. Midwinter, *Applied nonlinear optics*, vol. I. Wiley, 1973.




[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]