

Research Paper

# Theoretical Investigation of Effective Parameters on the Second Harmonic Generation Efficiency in AgGaSe<sub>2</sub> Crystal<sup>1</sup>

Mohammad Ghadimimehr<sup>\*2</sup>, Saeid Jelvani<sup>3</sup> and Ebrahim Safari<sup>4</sup>

Received: 2022.02.11

Revised: 2022.06.06

Accepted: 2022.07.10

## Abstract

The Silver Gallium selenide crystal is more important than other crystals due to its intrinsic parameters. The transparency of the AGSe crystal is in the wavelength range of 10.06 microns, which uses the pulsed CO<sub>2</sub> laser at atmospheric pressure (TEA) as the fundamental wavelength for the second harmonic generation. Therefore, the effect of parameters such as intensity, nonlinear crystal length, temperature and wavelength on the phase-mismatched and efficiency has been investigated. The coupled-wave equations are performed numerically by MATLAB software. The results indicate the existence of optimal length in the efficiency of the second harmonic generation in the crystal. In a crystal with a length of 1.05 cm, the efficiency reaches 80.35%. Also, the maximum efficiency of the second harmonic generation is 0.025W/cm<sup>2</sup> (threshold intensity) and the crystal length is 0.5 cm. The results of modeling and numerical calculations in this work are in good agreement with the experimental results of others.

**Keywords:** *CO<sub>2</sub> Laser, Efficiency, Second Harmonic Generation, AgGaSe<sub>2</sub> Crystal.*

<sup>1</sup> DOI: 10.22051/ijap.2022.39535.1264

<sup>2</sup>M. Sc. Graduated, Department of Physics, Tabriz University, Tabriz, Iran. (Corresponding Author) Email: ghadimimehr@yahoo.com

<sup>3</sup> Associate Professor, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran. Email: sjelvani@yahoo.com

<sup>4</sup> Associate Professor, Department of Physics, Tabriz University, Tabriz, Iran. Email: e\_safari@tabrizu.ac.ir

<https://jap.alzahra.ac.ir>



## بررسی نظری پارامترهای مؤثر در بازدهی تولید هماهنگ دوم در بلور $AgGaSe_2$ <sup>۱</sup>

محمد قدیمی مهر\*<sup>۲</sup>، سعید جلوانی<sup>۳</sup> و ابراهیم صفری<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۳/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۹

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال دوازدهم، پیاپی ۳۰، پاییز ۱۴۰۱

صص ۷۶ - ۸۴

### چکیده:

بلور سیلوگالنیوم سلناید ( $AgGaSe_2$ ) به دلیل برخی پارامترهای ذاتی خود، نسبت به سایر بلورها از اهمیت بیشتری برخوردار است. شفافیت بلور  $AgSe$  در محدوده طول موجی  $1.0/0.6$  میکرون است. از این رو، از لیزرگاز کربنیک پالسی در فشار جو ( $TEA$ ) به عنوان طول موج پایه برای تولید هماهنگ دوم استفاده می‌شود. تأثیر پارامترهایی چون شدت، طول بلور غیرخطی، دما و طول موج بر ناهمبندی فاز و بازده مورد بررسی قرار گرفته است. معادلات موج جفت شده به صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار  $MATLAB$  انجام شد. نتایج بدست آمده نشان دهنده وجود طول بهینه در میزان بازدهی تولید هماهنگ دوم در بلور می‌باشد. در بلوری به طول  $1/0.5$  سانتی متر، بازدهی به مقدار  $80/35$ ٪ می‌رسد. نتایج بدست آمده از مدل سازی و محاسبات عددی در کار حاضر با نتایج تجربی دیگران هماهنگ است.

**واژگان کلیدی:** لیزرگاز کربنیک، هماهنگ دوم، بازدهی، بلور  $AgGaSe_2$

<sup>1</sup> DOI: 10.22051/ijap.2022.39535.1264

<sup>۲</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. (نویسنده مسئول). Email: ghadimimehr@yahoo.com

<sup>۳</sup> دانشیار، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران. Email: sjelvani@yahoo.com

<sup>۴</sup> دانشیار، گروه فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. Email: e\_safari@tabrizu.ac.ir



## ۱. مقدمه

با توجه به این که تولید نور در تمامی نواحی بسامدی امکان پذیر نیست، از این رو، دو برابر شدن بسامد تابش لیزر گاز کربنیک برای چندین سال مورد توجه بوده است. به همین دلیل، علاقه‌ای به بلورهای غیرخطی وجود دارد که می‌توانند نور یک لیزر گاز کربنیک را که در محدوده ۹/۲۶ تا ۱۰/۰۶ میکرون قابل تنظیم است، به هماهنگی دوم خود تبدیل کنند. بلور  $AgGaSe_2$  با انکسار مضاعف و انتقال مادون قرمز گسترده، گزینه بسیار خوبی برای کاربردهای افزارهای غیرخطی، به ویژه در طیف مادون قرمز است، چرا که چنین بلورهایی محدوده طیفی (۴/۶ تا ۵ میکرون) منابع موجود تابش همدوس را گسترش می‌دهند. بلور  $AgGaSe_2$  یک بلور تک محوری منفی با تقارن  $42m$  است. با تولید هماهنگی دوم از خروجی یک لیزر گاز کربنیک در فشار اتمسفر با تحریک عرضی (TEA) می‌توان عملکرد غیر خطی این بلور را نشان داد. به دلیل کوچک بودن شکست مضاعف این بلور فقط جورشدگی فاز نوع اول (I) برای هماهنگی دوم امکان پذیر است. بازدهی، کیفیت نور خروجی از بلور، ویژگی‌های ذاتی و پارامترهای آن در به دست آوردن نتایج بسیار مؤثر هستند. با تغییر در پارامترهای بلورهای غیرخطی و لیزر پایه می‌توان به بیشینه بازدهی تولید هماهنگی دوم دست یافت. برای اولین بار محمد عبدالرحمان و همکارش [۱]، پژوهش‌های نظری کاملی در مورد حل دقیق بازده هماهنگی دوم و ناجورشدگی فاز در محیط غیرخطی بدون تلفات را با در نظر گرفتن اثر واگرایی پرتو انجام دادند. آن‌ها محدوده طول موج و طول بلور BBO را با فرض "محیط بدون تلفات"، تعیین کردند، سپس بازده هماهنگی دوم را به عنوان تابعی از طول موج لیزر و طول بلور برای هر دو نوع جور شدگی فاز بدست آوردند. در این مقاله از رابطه بازده تبدیل هماهنگی دوم برای تعیین مقدار چگالی توان، طول موج لیزر و طول بلور  $AgGaSe_2$  برای نوع اول جورشدگی فاز استفاده شده است. اثر دما بر ناجورشدگی فاز نیز بررسی شده است.

## ۲. محاسبات نظری

با استفاده از جفت‌شدگی معادلات موج (آرمسترانگ) برای دو موج تخت با بسامدهای  $\omega_1$  و  $\omega_2$  که در یک محیط بدون اتلاف و در راستای محور  $Z$  منتشر می‌شود، تغییرات دامنه دو موج نسبت به جهت انتشار در دستگاه SI را می‌توان به صورت زیر نوشت [۲۰]:

$$\frac{dA_1}{dz} = \frac{2i\omega_1^2 d_{eff}}{k_2 c} A_2 A_1^* \exp(-i\Delta kz) \quad (1)$$



$$\frac{dA_2}{dz} = \frac{2\pi i \omega_2^2 d_{\text{eff}}}{k_2 c} A_1^2 \exp(i\Delta k z) \quad (2)$$

که در آن،  $\Delta k = 2k_1 - k_2$  و  $d_{\text{eff}}$  به ترتیب پارامتر ناچورشدگی فاز و ضریب غیرخطی مؤثر می‌باشند [۳].

$$A_1 = \frac{2i\omega_2^2 d_{\text{eff}}}{k_2 c^2 \Delta k} A_2 A_1^* (\exp(i\Delta k l)) - 1 \quad (3)$$

$$A_2 = \frac{2i\omega_2^2 d_{\text{eff}}}{k_2 c^2 \Delta k} A_1^2 (\exp(i\Delta k l)) - 1 \quad (4)$$

در معادلات (۳) و (۴) دامنه را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$A_1 = \rho_1(z) e^{i\varphi_1(z)} \quad (5)$$

$$A_2 = \rho_2(z) e^{i\varphi_2(z)} \quad (6)$$

که در آن‌ها،  $\rho_1$  و  $\rho_2$  اعداد ثابت هستند. همچنین، زاویه را به صورت متغیر  $\theta = 2\varphi_1 - \varphi_2 + \Delta k z$  در نظر می‌گیریم [۴ و ۱].

شدت کل دو موج به صورت  $I = I_1 + I_2$  می‌باشد، جایی که شدت هر موج برابر است با [۴ و ۱]:

$$I = 2n\epsilon_0 c |A|^2 \quad (7)$$

چگالی توان کل در محیط بدون تلفات به شکل زیر به دست می‌آید:

$$I = I_1 + I_2 = \frac{1}{2} n_1 \epsilon_0 c \rho_1^2 + \frac{1}{2} n_2 \epsilon_0 c \rho_2^2 = \text{const} \quad (8)$$

اگر تعریف کنیم:

$$u = \left( \frac{k_1 c^2 \epsilon_0}{2\omega_1 I} \right)^{\frac{1}{2}} \rho_1 \quad (9)$$

$$v = \left( \frac{k_2 c^2 \epsilon_0}{4\omega_1 I} \right)^{\frac{1}{2}} \rho_2 \quad (10)$$

$$\xi = \left( \frac{4\omega_1^2 d_{\text{eff}}}{k_1 c^3} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\omega_1 I}{k_2 \epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} z \quad (11)$$

$$u^2 + v^2 = 1 \quad (12)$$



$$\xi = \frac{1}{2} \int_{u^2(0)}^{u^2(\xi)} \frac{d(u^2)}{\left[ (1-u^2)^2 u^2 - \frac{1}{4} \Delta s^2 u^4 \right]} \quad (13)$$

$$y^2 = \frac{u^2(\xi)}{u_1^2} \quad (14)$$

$$\gamma = \frac{u_1^2}{u_2^2} \quad (15)$$

$$u_1^2 = 1 + \frac{\Delta s^2}{8} - \frac{\Delta s}{2} \left( 1 + \frac{\Delta s^2}{16} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

$$u_2^2 = 1 + \frac{\Delta s^2}{8} + \frac{\Delta s}{2} \left( 1 + \frac{\Delta s^2}{16} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

که در آن  $\Delta s = \Delta k \cdot L$  پارامتر ناچورشدگی فاز بهنجار شده می باشد [۱]. بنابراین داریم:

$$\Delta s = \frac{k_1 c^3}{4 \omega_1^2 d_{eff}} \left( \frac{k_2 \epsilon_0}{\omega_1 I} \right)^{\frac{1}{2}} \Delta k \quad (18)$$

بازده  $\eta$  برای تبدیل توان از موج  $\omega_1$  به موج  $\omega_2$  را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\eta_{SHG} = \frac{u_2^2(L)}{u_1^2(0)} \quad (19)$$

$$\eta_{SHG} = \frac{u_2^2(\xi)}{u_1^2(0)} = sn^2 \left[ \frac{4 \omega_1^2 d_{eff} u_b L}{k_1 c^3} \left( \frac{\omega_1 I}{k^2 \epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}, \frac{u_a}{u_b} \right] \quad (20)$$

$$\eta_{shg} = u^2 = u_a^2 sn^2 \left[ \frac{4 \omega_1^2 d_{eff} u_b L}{k_1 c^3} \left( \frac{\omega_1 I}{k^2 \epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}, \frac{u_a}{u_b} \right] \quad (21)$$

$$\eta_{shg} = (1 - R_2) u_a^2 sn^2 \left[ 10.9078 \frac{d_{eff} u_b L}{n_1 \lambda_1} \left( \frac{(1 - R_1) I}{n_2} \right)^{\frac{1}{2}}, \frac{u_a}{u_b} \right] \quad (22)$$

$$R_1 = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (23)$$

$$\Delta s = 916.7688 \frac{n_1 \lambda_1}{d_{eff}} \left( \frac{n_2}{1-R_1} \right)^{\frac{1}{2}} \Delta k \quad (24)$$

که در آن  $R_1$  و  $R_2$  به ترتیب درصد بازتاب از سطح ورودی و خروجی بلور می‌باشند [۵ و ۱].  
ناجورشدگی فاز نوع اول برای بلورهای تک‌محوری منفی به صورت زیر است [۶]:

$$\Delta k_1(\theta) = \frac{4\pi}{\lambda_1} [n_{o\omega} - n_{e2\omega}(\theta)] \quad (25)$$

که در آن  $\theta$ ، زاویه جورشدهگی فاز می‌باشد. ناجورشدگی فاز بر اساس رابطه زیر داده می‌شود [۶ و ۱].

$$\Delta k_1(\theta) = \frac{\pi d \theta}{n_{o\omega} \lambda_1} \left[ ((n_{e2\omega}^{-2} - n_{o2\omega}^{-2}) \sin^2(\theta) + n_{o2\omega}^{-2})^{\frac{-3}{2}} \right] * ((n_{e2\omega}^{-2} - n_{o2\omega}^{-2})) \sin(2\theta) \quad (26)$$

## ۱.۲ تغییر دما در بلور سیلور گالیوم سلناید

در دمای ۲۹۳ K و در طول موج  $\lambda$ ، ضرایب شکست  $n_o$  و  $n_e$  برای بلور  $AgGaSe_2$  با رابطه‌های زیر به دست می‌آید [۷].

$$n_{oo}^2 = 3.9362 + \frac{2.9113}{\lambda^2 - (0.38721)^2} + \frac{1.7954}{\lambda^2 - (1600)^2} \quad (28)$$

$$n_{eo}^2 = 3.3132 + \frac{3.3616}{\lambda^2 - (0.38201)^2} + \frac{1.7677}{\lambda^2 - (1600)^2}$$

با فرض تغییر دمای بلور بر اثر تابش لیزر، خواهیم داشت [۷]:

$$\Delta T = T_1 - 293 \quad (29)$$

تغییرات ضرایب شکست نسبت به دما برای بلور  $AgGaSe_2$  به صورت زیر است [۷]:

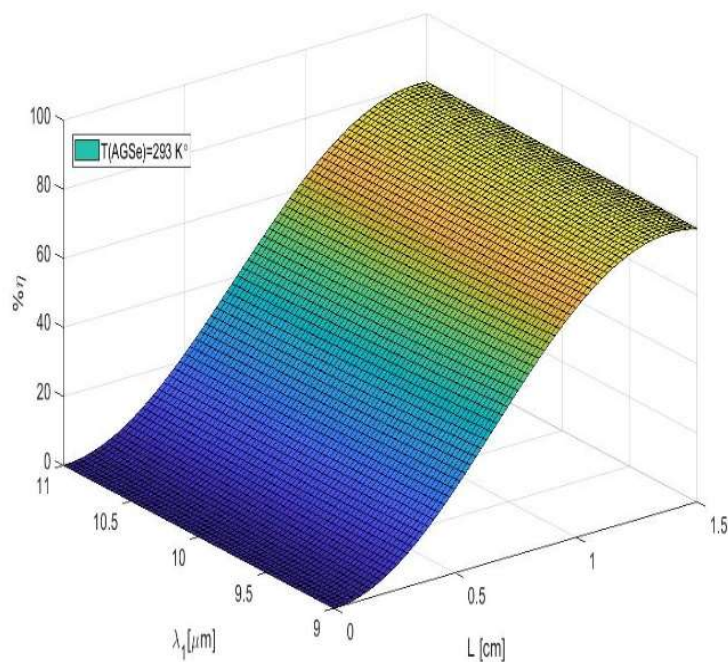
$$N_o(\omega, T) = n_o(\omega) + \frac{dn_o(\omega)}{dT} \times \Delta T \quad (30)$$



$$N_e(\omega, T) = n_e(\omega) + \frac{dn_e(\omega)}{dT} \times \Delta T$$

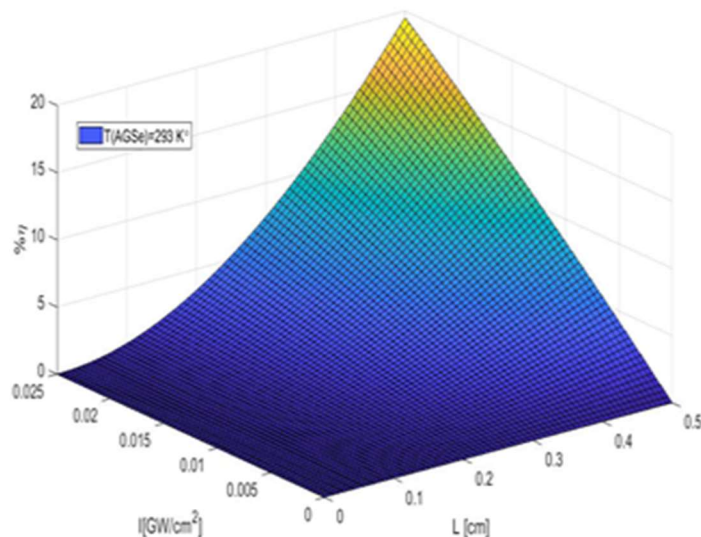
### ۳. نتایج

با به کار بردن معادلات به دست آمده از بخش نظری در برنامه **MATLAB**، اثر طول بلور، شدت تابش ورودی و طول موج لیزر در بلور با فرض ثابت نگه داشتن دما و همچنین اثر دما در بازدهی هماهنگ دوم برای نوع اول بررسی شد. از شکل (۱) مشاهده می شود که با افزایش طول موج و طول بلور، بازدهی ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می یابد. این بستگی خطی در این محدوده از طول بلور نشان دهنده آن است که اتلاف جذب بسیار ناچیز است. در طول موج ۱۰/۳۶ میکرون و طول بلور ۱/۰۵ سانتی متر بازدهی به مقدار ۸۰/۳۵٪ می رسد. محدوده طول موج جفت شده و طول بلور به ترتیب (۹-۱۱ میکرون) و (۰/۵۰-۱ سانتی متر) است.



شکل ۱ تغییرات بازدهی هماهنگ دوم با طول موج لیزر و طول بلور AGSe.

یکی از محدودیت‌های مهم در بازده هماهنگ دوم، توان لیزر می‌باشد که به اثر لنز حرارتی<sup>۱</sup> در بلور نسبت داده می‌شود. داشتن یک آستانه لنز حرارتی ناشی از تابش لیزر، بایستگی کار با توان‌های متوسط کمتر از مقدار آستانه را نشان می‌دهد. همچنین، بازده هماهنگ دوم برای طول موج  $10/6$  میکرون به عنوان تابعی از چگالی توان و طول بلور مورد مطالعه قرار گرفت. شکل (۲) تغییرات بازده هماهنگ دوم با شدت لیزر گاز کربنیک و طول بلور  $\text{AGSe}$  را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بیشینه بازدهی تولید هماهنگ دوم به حدود  $20\%$  برای چگالی توان  $0/025 \frac{GW}{cm^2}$  (زیر آستانه آسیب بلور) و طول بلور  $0/5$  سانتی‌متر می‌رسد.



شکل ۲ تغییرات بازدهی هماهنگ دوم با شدت لیزر و طول بلور  $\text{AGSe}$ .

برای دست‌یابی به جورشدهگی فاز باید ضرایب شکست پرتوهای عادی و غیرعادی بلور را با دقت پایش نمود. برای این منظور اغلب از دو روش "تغییر زاویه تابش" و "تغییر دما" استفاده می‌شود. برخی از بلورهای دوشکستی، وابستگی شدیدی به دما دارند، این بلورها را می‌توان تحت زاویه صفر

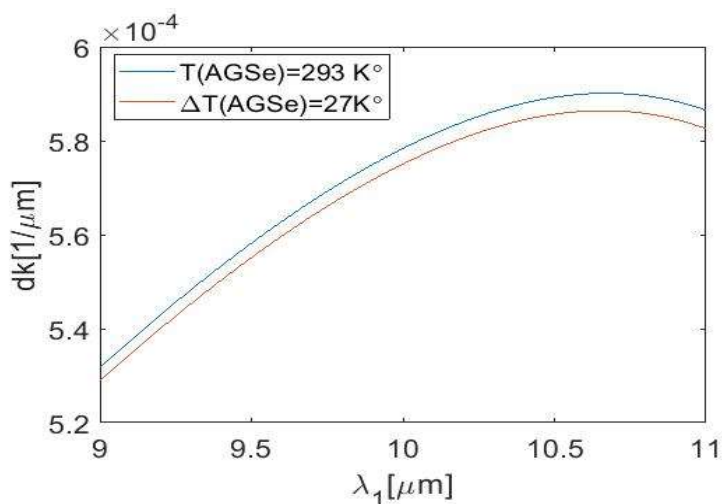
<sup>1</sup> Thermal Lens





و یا ۹۰ درجه نسبت به محور نوری بلور، تابش داده و با تغییر دمای بلور (تنظیم ضریب شکست) به جورشدگی فازی دست یافت.

شکل (۳) بستگی طول موج لیزر با پارامتر ناجورشدگی فاز با تغییر دما ( $\Delta T = 27k^\circ$ ) را نشان می دهد. باید توجه داشت که ضریب هدایت گرمایی این بلور در مقایسه با دیگر بلورهای تک محور، کمتر می باشد. از این رو، گرمای کمتری را از خود عبور می دهد و نسبت به افزایش دما از حساسیت بیشتری برخوردار است. در نتیجه سبب ایجاد اثر لنز حرارتی داخل بلور می شود که به راحتی به بلور آسیب می رساند. یکی از راه های بهبود بازده هماهنگ دوم خنک کردن بلور است که به صورت نهفته جذب و شیب شاخص حرارتی  $dn/dT$  را کاهش و هدایت حرارتی را افزایش می دهد. در شکل (۳) مشاهده می شود که ایجاد شرایط جورشدگی فاز در طول موج های پایین (۹ میکرون) نسبت به طول موج های بلند (۱۱ میکرون) امکان پذیر است. همچنین، تغییرات دما در طول موج های پایین (۹ میکرون) برای رسیدن به جورشدگی فاز کمتر است.



شکل ۳ بستگی طول موج لیزر با پارامتر ناجورشدگی فاز در اثر تغییر دما.

#### ۴. بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش تأثیر پارامترهایی چون طول بلور AGSe، شدت و طول موج لیزر گاز کربنیک بر بازدهی هماهنگ دوم و نیز اثر تغییر دما و طول موج لیزر بر ناجورشدگی فاز بررسی شده است.

بیشینه مقدار بازدهی هماهنگ دوم (۸۰/۳۵٪) مربوط به طول موج ۱۰/۳۶ میکرومتر در طول بلور ۱/۰۵ سانتی متر مشاهده شد. بلور  $\text{AGSe}$  نسبت به افزایش دما از حساسیت بالایی برخوردار است، از این رو، برای کاهش اثرهای حرارتی لیزری (اثر لنز حرارتی) با چگالی توان  $\frac{GW}{cm^2}$  ۰/۰۲۵ (زیرآستانه آسیب بلور) و طول بلور ۰/۵ سانتی متر ضروری است. همچنین تغییرات دما در طول موج‌های پایین (۹ میکرون) برای رسیدن به جوړشدگی فاز کمتر است.

## منابع

- [1] Rahman, M. A. & Alghoraibi, I., *Theoretical investigation of phase-mismatched second-harmonic conversion efficiency in BBO crystal*. Optik, 161, 196-203, 2018.
- [2] Shen, Y. R., *The Principles of Nonlinear Optics*. 3rd edn, 576, 2002.
- [3] Iyer, A.K., Cho, J.B., Byun, H.R., Waters, M.J., Hao, S., Oxley, B.M., Gopalan, V., Wolverton, C., Rondinelli, J.M., Jang, J.I. and Kanatzidis, M.G., *Structure Tuning, Strong Second Harmonic Generation Response, and High Optical Stability of the Polar Semiconductors  $\text{Na}_{1-x}\text{K}_x\text{AsQ}_2$* . Journal of the American Chemical Society, 143(43), 18204-18215, 2021.
- [4] Boyd, R. W., & Masters, B. R., *Nonlinear Optics 3rd edn* (New York: Academic), 2008.
- [5] Moller, K. D., *OPTICS Learning by Computing, with Examples Using Mathcad®, Matlab®, Mathematica®, and Maple®: With 308 Illustrations*. Springer, 2007.
- [6] Yao, J. & Wang, Y., *Nonlinear optics and solid-state lasers: advanced concepts, tuning-fundamentals and applications* (Vol. 164). Springer Science & Business Media, 2012.
- [7] Nikogosyan, D. N. & Gurzadyan, G. G., *New formulas for the calculation of phase-matching angles*. Soviet Journal of Quantum Electronics, 16(12), 1663, 1986.

© 2020 Alzahra University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

