

# بررسی تاثیر پارامترهای ناراستی بر روی اثر پذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم در چاه پتانسیل کرووی با ارتفاع محدود

علی رستمی - دانشیار گروه مهندسی الکترونیک دانشکده برق دانشگاه تبریز  
حسن رسولی سقایی - گروه مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز

## چکیده:

در این مقاله، ساختار چاه پتانسیل کرووی با ناراستی، پیشنهاد می شود. تاثیر ناراستی تعبیه شده در چاه کوانتومی کرووی با ارتفاع پتانسیل محدود روی اثر پذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم مربوط به گذارهای بین زیر باندهای الکترونی در محدوده طیف مادون قرمز بررسی می شود. عرض و ارتفاع پتانسیل ناراستی و همینطور فاصله و ارتفاع پتانسیل سد اصلی در ساختار مورد نظر روی مشخصه اثر پذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم تحلیل می گردد. با افزایش عرض و ارتفاع پتانسیل ناراستی و همچنین فاصله و ارتفاع پتانسیل سد اصلی نشان داده می شود که پیک و فرکانس تشدید اثر پذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم به ترتیب عمدتاً افزایش و شیفیت قرمز پیدا می کند. پیک اثر پذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم در این ساختار نسبت به ساختارهای موجود یک الی دو مرتبه افزایش نشان می دهد. با ساختار معرفی شده امکان تنظیم فرکانس تشدید و مقدار پیک اثر پذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم وجود دارد.  $\text{AlGaIn/GaN}$  به عنوان ماده ایجاد کننده ساختار پتانسیل پیشنهاد شده، استفاده می شود.

کلید واژه: پتانسیل کرووی، ناراستی، اثر پذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم.

## ۱- مقدمه

نیاز به ادوات عملیاتی فشرده نوری سرعت بالا، گرایش به سمت سیستم های پردازشگر تمام نوری در ساختارهای نامتجانس نیمه هادی را افزایش داده است [۱]. گذارهای مادون قرمز به خاطر داشتن

ماتریس دوقطبی و شدت نوسان بزرگ، توجه ویژه بسیاری از محققان را به غیرخطی های بین زیر باندهای جلب کرده است [۲]. در این راستا داشتن اثر پذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم قابل تنظیم با مقدار پیک بالا از اهمیت عملی فراوانی برخوردار است. در این زمینه چاهای پتانسیل کوانتومی نامتقارن بیشتر مورد توجه واقع شده اند. [۳-۷]. در این مقاله با پیشنهاد یک ساختار پتانسیل جدید امکان دستیابی به پیک اثر پذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم بالاتر و قابل تنظیم در طول موج های مادون قرمز بزرگ (با طول موج قابل تنظیم) فراهم می شود. اثر تغییر ابعاد و پتانسیل های موجود در ساختار در تنظیم فرکانس تشدید و پیک اثر پذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم مورد بررسی قرار میگیرد. نشان خواهیم داد ساختار معرفی شده افزایش پیک اثر پذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم قابل ملاحظه ای (در حد یک الی دو مرتبه مقداری نسبت به ساختارهای موجود [۳-۷]) از خود نشان می دهد. همچنین با شبیه سازی های انجام شده نشان داده می شود در ابعاد کوچک از قطعه مورد نظر، دسترسی به طول موجهای بزرگ امکان پذیر است. در ادامه این مقاله بخشهای زیر بررسی میشود. در بخش دوم تئوری مساله گفته خواهد شد. شبیه سازیهای لازم در بخش سوم ارائه میگردد. نهایتاً مقاله با نتیجه گیری خاتمه داده میشود.

## ۲- تئوری مساله

در این قسمت، قالب ریاضی لازم برای بررسی خواص الکتریکی و نوری نیمرخ پتانسیل پیشنهاد شده، ارائه می گردد. شکل (۱) توزیع پتانسیل مورد نظر را نشان میدهد. در این شکل،  $b, V_{02}, b, V_{01}, a$  به



$$r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + 2r \frac{dR}{dr} + \left\{ \frac{2m_i^*}{\hbar^2} [E - V_i(r)] r^2 - \ell(\ell+1) \right\} R = 0 \quad (4)$$

جوابهای دقیق این معادله بر اساس توابع بسل کروی در دو حالت به صورت زیر خواهند بود:  
برای  $E < V_{01}$ :  
(الف-۵)

$$R = \begin{cases} [C_1 i_\ell(\kappa_1 r)] \sqrt{\frac{2}{\pi}} & 0 < r < a \\ [C_2 j_\ell(\kappa_2 r) + C_3 n_\ell(\kappa_2 r)] \sqrt{\frac{2}{\pi}} & a < r < b \\ [C_4 k_\ell(\kappa_3 r)] \sqrt{\frac{\pi}{2}} & b < r \end{cases}$$

که در آن:  
(ب-۵)

$$\begin{cases} \kappa_1 = \sqrt{\frac{2m_1^*(V_{01} - E)}{\hbar^2}} & 0 < r < a \\ \kappa_2 = \sqrt{\frac{2m_2^*E}{\hbar^2}} & a < r < b \\ \kappa_3 = \sqrt{\frac{2m_3^*(V_{02} - E)}{\hbar^2}} & b < r \end{cases}$$

و برای  $E > V_{01}$ :  
(ج-۵)

$$R = \begin{cases} [C_1 j_\ell(\kappa_1 r)] \sqrt{\frac{2}{\pi}} & 0 < r < a \\ [C_2 j_\ell(\kappa_2 r) + C_3 n_\ell(\kappa_2 r)] \sqrt{\frac{2}{\pi}} & a < r < b \\ [C_4 k_\ell(\kappa_3 r)] \sqrt{\frac{\pi}{2}} & b < r \end{cases}$$

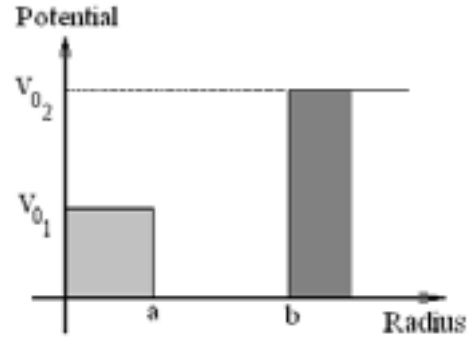
که در آن:  
(د-۵)

$$\kappa_1' = \sqrt{\frac{2m_1^*(E - V_{01})}{\hbar^2}}$$

حال تابع موج کلی الکترون مربوط به ساختار پتانسیلی ارائه شده به صورت زیر بیان می گردد.

$$\psi_{nlm} = R_{nl}(r) Y_{lm}(\theta, \phi) \quad (6)$$

ترتیب شعاع ناراستی، ارتفاع ناراستی، فاصله سد اصلی از مبدا، ارتفاع سد اصلی و عرض چاه کروی را نشان می دهند. این ساختار را می توان به آسانی با تغییر کسر مولی AlGaIn در نواحی مختلف تحقق بخشید.



شکل ۱. توزیع پتانسیل کروی پیشنهاد شده

برای بررسی توابع موج و ترازهای انرژی مربوطه، از معادله جرم موثر استفاده می گردد. معادله شرودینگر (با لحاظ کردن تقریب جرم موثر) در مختصات کروی به صورت زیر خواهد بود:  
(۱)

$$\left\{ \frac{\hbar^2}{2m_i^*} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} r + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) \right] \times \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + V_i(r) \right\} \psi(r, \theta, \phi) = E \psi(r, \theta, \phi)$$

که در آن،  $V_i(r) = \begin{cases} V_{01} & 0 < r < a \\ 0 & a < r < b \\ V_{02} & b < r \end{cases}$  و  $m_i^* = \begin{cases} m_1^* & 0 < r < a \\ m_2^* & a < r < b \\ m_3^* & b < r \end{cases}$

جرم موثر و توزیع پتانسیل در نواحی مختلف می باشند. حال با در نظر گرفتن روش جداسازی متغیرها، می توان جواب معادله (۱) را به صورت زیر در نظر گرفت.  
(۲)

$$\psi(r, \theta, \phi) = R(r) P(\theta) Q(\phi)$$

با جایگذاری جواب فوق در معادله (۱)، جواب زیر برای قسمت [۸] زاویه ای بدست می آید.  
(۳)

$$Y_{lm}(\theta, \phi) = P(\theta) Q(\phi) = (-1)^m \left[ \frac{(2\ell+1)(\ell-m)!}{4\pi(\ell+m)!} \right]^{\frac{1}{2}} P_\ell^m(\cos \theta) e^{im\phi}$$

در رابطه فوق  $\ell$ ،  $m$  اعداد صحیح می باشند. معادله شعاعی به صورت زیر بیان میشود.





در رابطه فوق  $n$  عدد صحیح می باشد.

برای تعیین دقیق مقادیر ویژه انرژی و ثابتهای ظاهر شده در توابع موج، از شرایط پیوستگی در مرزها و شرط نرمالیزه بودن تابع موج بایستی استفاده کرد.

برای  $r=a$

(۷-الف)

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{0 < r < a}(a) = R_{a < r < b}(a) \\ \frac{1}{m_1} \frac{dR_{0 < r < a}}{dr} \Big|_{r=a} = \frac{1}{m_2} \frac{dR_{a < r < b}}{dr} \Big|_{r=a} \end{array} \right.$$

و برای  $r=b$

(۷-ب)

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{a < r < b}(b) = R_{b < r}(b) \\ \frac{1}{m_2} \frac{dR_{a < r < b}}{dr} \Big|_{r=b} = \frac{1}{m_3} \frac{dR_{b < r}}{dr} \Big|_{r=b} \end{array} \right.$$

شرط نرمالیزه بودن قسمت شعاعی تابع موج به صورت زیر خواهد بود.

(۸)

$$\int_0^{\infty} dr r^2 R_{n\ell}^2(r) = 1$$

اکنون بعد از مشخص سازی توابع موج و مقادیر ویژه انرژی، محاسبه اثرپذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم در این ساختار ارائه می گردد. اثرپذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم را می توان از نظر تئوریک با فرض اینکه فقط تراز پایه (تراز انرژی اول) پر شده است، محاسبه کرد [۱۰،۹]. با استفاده از مدل سیستم دو ترازه اثرپذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم به صورت زیر داده می شود [۱۱،۲]:

(۹)

$$\chi^{(2)} = \frac{N_d e^3 \alpha_{fg}^3}{\epsilon \hbar^2} \left[ \frac{1}{(\omega - \omega_{fg} - i\gamma_{fg}) \times (2\omega - 2\omega_{fg} - i\gamma_{fg})} \right]$$

که در آن:

$$\tau, \gamma_{fg} = \frac{1}{\tau}, E_g, E_f, \omega_{fg} = \frac{E_f - E_g}{\hbar}$$

و

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0, \psi_g, \psi_f, \alpha_{fg} = \langle \psi_f | r | \psi_g \rangle, e, N_d$$

به ترتیب چگالی حامل، بار الکترون، عنصر ماتریس گذار دو قطبی، تابع موج حالت تحریک شده اول، تابع موج حالت پایه، گذردهی الکتریکی ماده چاه پتانسیل، فرکانس گذار، تراز انرژی

تحریک شده اول، تراز انرژی پایه، نرخ واهلش و زمان واهلش می باشند.

### ۳- شبیه سازی ساختار معرفی شده

در این قسمت نتایج مربوط به شبیه سازی اثرپذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم مربوط به چاه پتانسیل کروی با ساختار پتانسیل پیشنهاد شده در شکل (۱) و تاثیر پارامترهای مختلف (ماده و ساختار) بر روی آن، ارائه و بحث می گردند. پارامترهای مربوط به مواد مورد نظر در ساختار پیشنهاد شده، در جدول (۱) آورده شده است [۱۲].

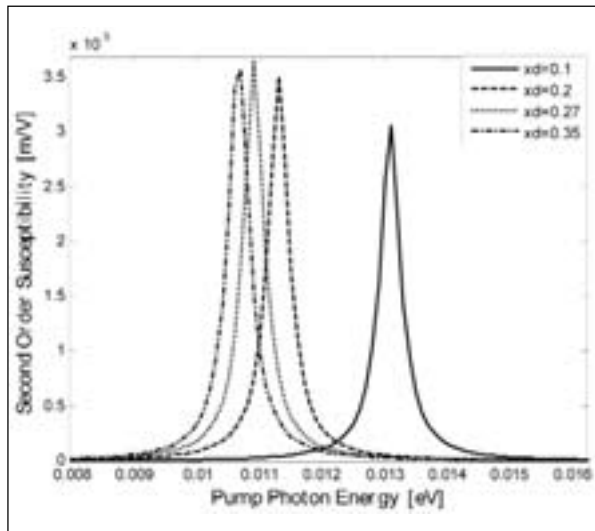
جدول (۱) پارامترهای ماده

AlxGa1-xN Parameters	Unit	Value
Electron effective mass ( $m^*$ )	$m_0$	$0.252x + 0.228$
Band gap ( $E_g(x)$ )	eV	$6.13x + (1-x) \times 3.42 - x(1-x)$
Band offset ( $\Delta E_c(x)$ )	eV	$0.7 \times [E_g(x) - E_g(0)]$
Typical Relaxation constant ( $\hbar\gamma$ )	meV	0.3, 0.6
Number density of carriers (N)	$m^{-3}$	$1 \times 10^{24}$
Static dielectric constant	-	10.4

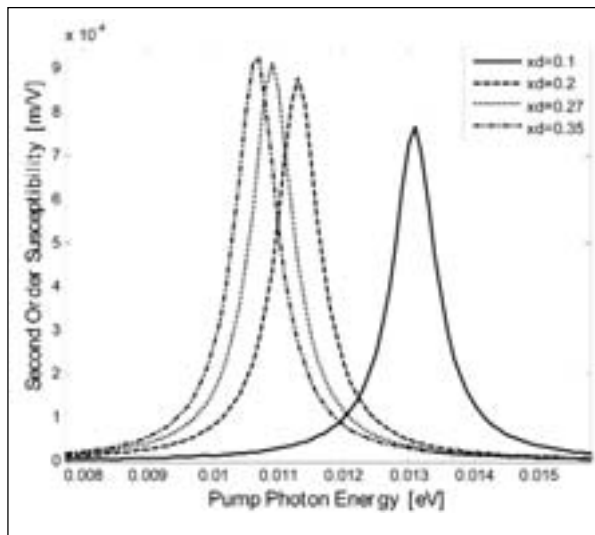
در ادامه این بخش اثر پارامترهای مختلف پتانسیل معرفی شده را روی طیف اثرپذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم بررسی میکنیم. لازم به ذکر است که در محاسبه اثرپذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم، انرژی حالت پایه و انرژی حالت تحریک شده اول، به کار گرفته شده است.

ابتدا اثر عرض ناراستی را روی اثرپذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم تحلیل می نماییم. مشاهده میشود با افزایش عرض ناراستی در ارتفاع پتانسیل ناراستی ثابت (شکل (۲))، مقدار پیک اثرپذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم افزایش یافته و شیفت قرمز پیدا میکند. این موضوع به کاهش عرض چاه مربوط میشود. به عبارت دیگر با افزایش عرض ناراستی ترازهای انرژی در ساختار معرفی شده به انرژیهای بالا شیفت پیدا کرده و ضمن این جابجایی فاصله بین ترازها نیز کاهش مییابد. افزایش پیک اثرپذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم به دلیل افزایش ماتریس دوقطبی با کاهش فاصله ترازها (هم پوشانی بیشتر توابع موج ترازهای پایه و تحریک شده) مییابد. برای نشان دادن تاثیر نرخ واهلش  $\hbar\gamma$  در فرآیند اثرپذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم، دو مقدار برای ثابت واهلش در نظر گرفته شده است که در گراف های (a) و (b) نشان داده شده اند. نشان داده شده است، با افزایش ثابت واهلش،

نهایتاً در شکل (۵) تاثیر فاصله سد پتانسیل اصلی روی مشخصه اثر پذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم مورد آزمایش قرار میگیرد. مشاهده شده است با افزایش فاصله سد پتانسیل اصلی، پیک اثر پذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم افزایش یافته و شیفت قرمز مشاهده میشود. این شیفت قرمز به کاهش انرژیها، همزمان با کاهش فاصله بین آنها مربوط میشود. همچنین افزایش پیک با افزایش فاصله سد پتانسیل اصلی به دلیل افزایش ماتریس دو قطبی (به خاطر کاهش فاصله تراز پایه و تراز تحریک شده) می باشد.



a)



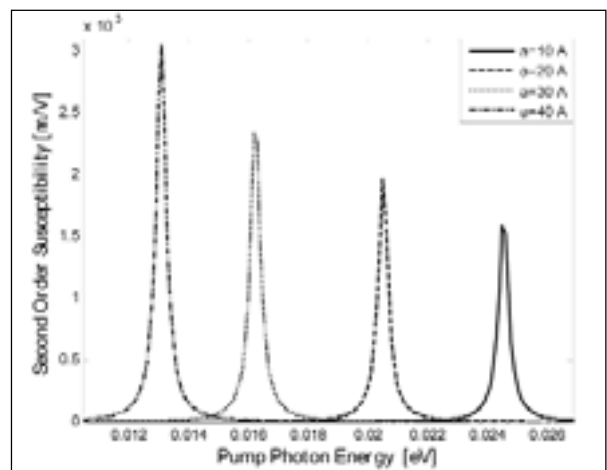
b)

شکل ۳. اثر پذیری نوری مرتبه دوم برحسب انرژی فوتون و پتانسیل ناراستی به عنوان پارامتر

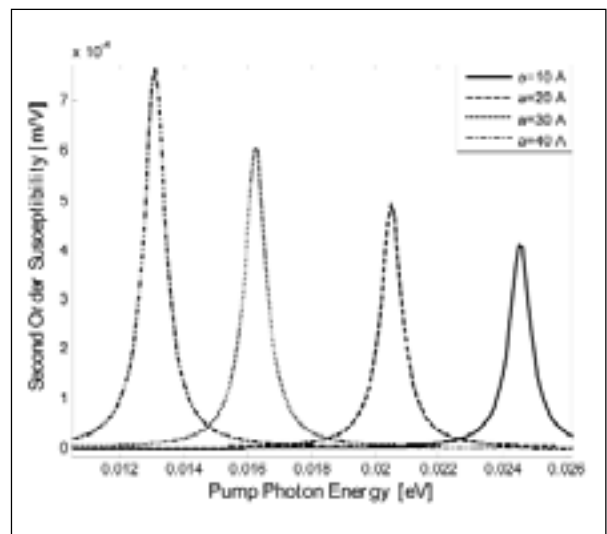
( $b = 75 \text{ \AA}^*$ ,  $x_b = 0.35$ ,  $x_d = 40 \text{ \AA}^*$ ) a)  $\hbar\gamma = 0.3 \text{ meV}$ ,  
 $\hbar\gamma = 0.6 \text{ meV}$

پیک اثر پذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم کاهش مییابد.

در شکل (۳)، اثر کسرمولی (ارتفاع پتانسیل) ناراستی بر روی مشخصه اثر پذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم بررسی شده است. با افزایش ارتفاع ناراستی، پیک های اثر پذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم (به خاطر جابجایی ترازهای انرژی به سمت بالا و کاهش فاصله آنها) شیفت قرمز پیدا می کنند. افزایش نسبی پیک به خاطر خاطر افزایش ماتریس دو قطبی در انرژیهای پایین تر، با افزایش ارتفاع ناراستی است. در شکل (۴)، مشخصه اثر پذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم به ازای ارتفاع پتانسیل مختلف سد اصلی داده شده است. با افزایش ارتفاع سد اصلی، پیک ها به سمت انرژی های پایین تر جابجا می شود. افزایش پیک (با افزایش ارتفاع سد) دوباره به خاطر افزایش ماتریس دو قطبی است.



a)

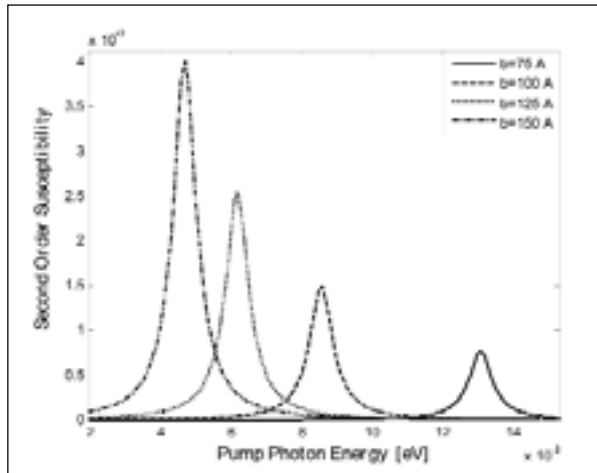


b)

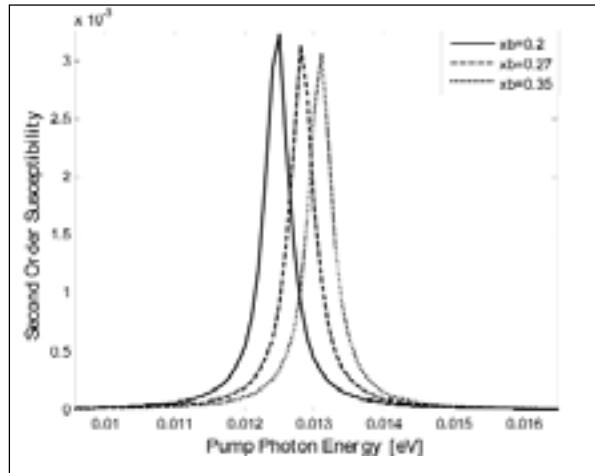
شکل ۴. اثر پذیری نوری مرتبه دوم برحسب انرژی فوتون و عرض ناراستی به عنوان پارامتر

( $b = 75 \text{ \AA}^*$ ,  $x_b = 0.35$ ,  $x_d = 0.1$ ) a)  $\hbar\gamma = 0.3 \text{ meV}$ , b)  $\hbar\gamma = 0.6 \text{ meV}$





b)



a)

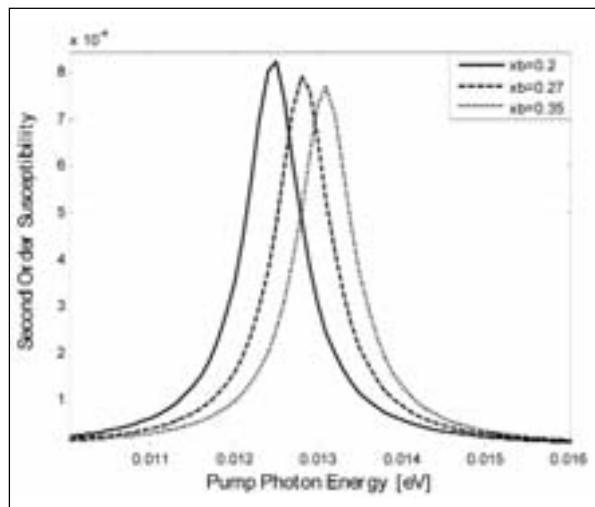
شکل ۵. اثر پذیری نوری مرتبه دوم جذب برحسب انرژی فوتون و فاصله سد پتانسیل اصلی به عنوان پارامتر  
 (a)  $\hbar\gamma = 0.3 \text{ meV}$ , (b)  $\hbar\gamma = 0.6 \text{ meV}$

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله، ساختار جدیدی برای مدیریت اثر پذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم در ادوات اپتوالکترونیک پیشنهاد شد. تاثیر تمام پارامترهای ساختار ارائه شده روی اثر پذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم مطالعه شد. برای مدیریت اثر پذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم، پارامترهای ناراستی و سد اصلی در ساختار پیشنهادی برای حصول به بهترین عملکرد (مقدار پیک و فرکانس تشدید) مورد آزمایش قرار گرفت. نشان داده شد ساختار پیشنهادی میتواند مقدار پیک اثر پذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم بالا برده (4-10~2-10 m/V) و قابلیت تنظیم مقدار پیک و فرکانس تشدید اثر پذیری نوری غیرخطی مرتبه دوم را دارا است. همچنین نشان داده شد با ابعاد نسبتاً کوچک المان پیشنهادی، جذب در طول موج های بزرگتر ( $60 \mu\text{m} \ll \lambda < 4 \mu\text{m}$ ) امکان پذیر می باشد.

#### ۵- مراجع

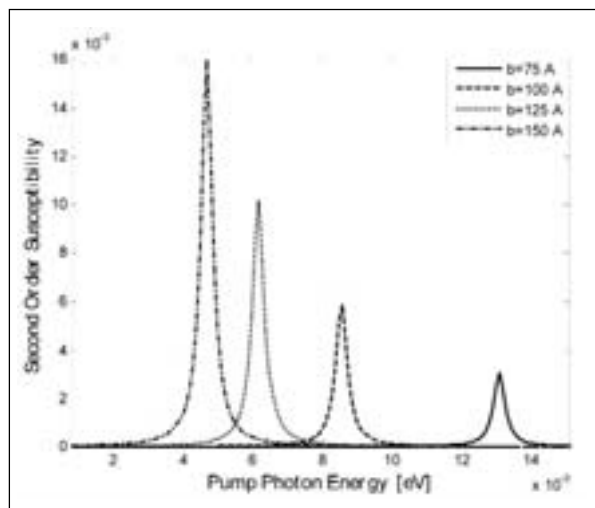
- [1] S. Sauvage, P. Boucaud, T. Brunhes, F. Glotin, R. Prazeres, J. M. Ortega, J. M. Gerard, "Second-harmonic generation resonant with s-p transition in InAs/GaAs self-assembled quantum dots", Phys. Rev. B 63 (2001) 113312.
- [2] T. Brunhes, P. Boucaud, S. Sauvage, F. Glotin, R. Prazeres, J.-M. Ortega, A. Lemaître and J.-M. Gérard, "Midinfrared second-harmonic generation in p-type InAs/GaAs self-assembled quantum dots", APPLIED PHYSICS LETTERS, VOLUME 75, NUMBER 6, 9 AUGUST 1999.
- [3] Jingliang Liu, Yaochen Bai, Guiguang Xiong, "Studies of the second-order nonlinear optical susceptibilities of GaN/AlGaIn quantum well", Physica E 23 (2004), 70-74.
- [4] E ROSENCHER, P BOIS, J NAGLE, S DPLAIRE, "SECOND HARMONIC GENERATION BY INTERSUB-BAND TRANSITIONS IN COMPOSITIONALLY ASYMMETRIC MQWs", ELECTRONICS LETTERS 3rd August 1989 Vol. 25 No. 16
- [5] S. J. B. Yoo, M. M. Fejer, and R. L. Byer, "Second-order susceptibility in asymmetric quantum wells and its control by proton bombardment", Appl. Phys. Lett. 58 (16), 22 April 1991.
- [6] Pjuh-Tzeng Lue,, " Surface Second Harmonic Generation from GaAs/GaAl<sub>1-x</sub>As Quantum wells", CHINESE JOURNAL OF PHYSICS, VOL. 31, NO. 4, AUGUST 1993.
- [7] E. L. Martinet, H. C. Chui, G. L. Woods, M. M. Fejer, and J. S. Harris, Jr., C. A. Rella, B. A. Richman, and H. A. Schwetman, "Short wavelength (5.36-1.85 μm) nonlinear spectroscopy of coupled InGaAs/AlAs intersubband quantum wells", Appl. Phys. Lett. 65 (21), 21 November 1994.



b)

شکل ۴. اثر پذیری نوری مرتبه دوم برحسب انرژی فوتون و پتانسیل سد اصلی به عنوان پارامتر

a)  $\hbar\gamma = 0.3 \text{ meV}$  b)  $\hbar\gamma = 0.6 \text{ meV}$



a)

