



## بررسی ویژگی های اپتیکی رینگ کوانتومی متشکل از چندین چاه کوانتومی با روش تنگ بست

مهدی سلیمانی\*، علیرضا مبینی

<sup>۱</sup>دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی قم-قم-ایران.

<sup>۲</sup>دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، صنعتی قم-قم-ایران.

\* [solaimani@qut.ac.ir](mailto:solaimani@qut.ac.ir)

چکیده - در این مقاله ویژگی های اپتیکی رینگ کوانتومی مبتنی بر چاه کوانتومی چند گانه با استفاده از روش تنگ بست بررسی شده و اثر تغییر تعداد چاهها و پتانسیل اعمالی روی این ویژگی ها بدست آمده است. ترازهای انرژی و توابع موج برای دو رینگ کوانتومی با شعاع یکسان ۶۰ نانومتر و تعداد چاههای دو و چهار محاسبه و رسم شده است. نتایج نشان می دهد با افزایش تعداد چاه ها، انرژی حالت پایه افزایش می یابد و توابع موج در مراکز چاه ها جایگزیده میشوند. همچنین مقدار جذب ساختار با تغییر تعداد چاهها از دو به چهار دارای ۱۳٪ کاهش و بیشینه جذب دارای جابجایی آبی به مقدار ۱۵ میلی الکترون ولت است.

کلید واژه- روش تنگ بست، رینگ کوانتومی، چاه کوانتومی چندگانه، جذب.

### Study of Optical Properties of Quantum Ring Based on MQW Using Tight-Binding Method

Mahdi Soleymani\*, Alireza Mobini

Department of Physics, Qom University of Technology, Department of Electrical and Computer Engineering, Qom University of Technology

Abstract- In the present work we have studied optical properties of quantum ring based on MQW using tight-binding method considering the effects of well number and confinement potential. For two rings with same circumference of 60 nm and different number of wells, 2 and 4, wave functions and energy eigenvalues have been calculated. The results shows with increasing well numbers the energy eigenvalues increases and the wave function confined in the well centers. Also with increasing well numbers from two to four wells, the absorption coefficient of structure decrease %13 and the peak of absorption has 15meV blue shift.

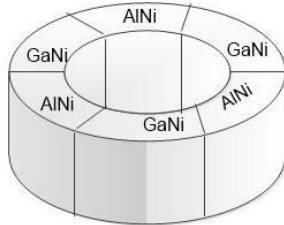
Keywords: Tight Binding Method, Quantum Ring, Multiple Quantum Well, Absorption.

## ۱- مقدمه

## ۲- ساختار و روش شبیه سازی

## ۲-۱- نمای ساختار

شکل (۱) نمای ساختار شبیه سازی شده را نشان می دهد.



شکل ۱: نمای ساختار رینگ کوانتومی مبتنی بر چندین چاه کوانتومی متشکل از GaNi و AlNi.

آنطور که از شکل مشخص است رینگ متشکل از سه چاه کوانتومی است که هرچاه از ساختار GaNi/AlNi تشکیل شده است. در این شبیه سازی رینگی با محیط ۶۰ نانومتر در نظر گرفته شده است.

## ۲-۲- فرمول بندی

یک رینگ کوانتومی شامل  $N$  سایت از اتم های مشابه در نظر بگیرد. معادله تنگ بست برای این ساختار به شکل زیر نوشته می شود [۵]:

$$\hat{H} = \sum_{n=1}^N \left[ (2t + V_n) c_n^\dagger c_n - t c_{n+1}^\dagger c_n - t c_n^\dagger c_{n+1} \right] \quad (1)$$

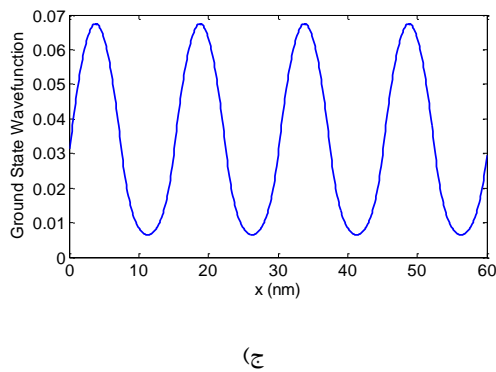
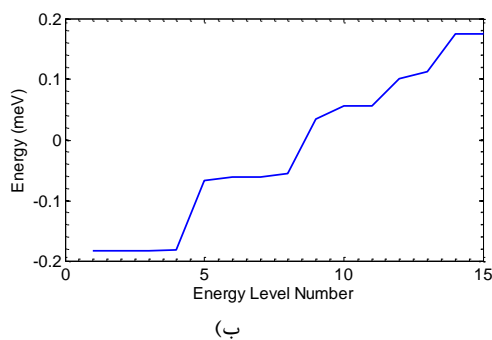
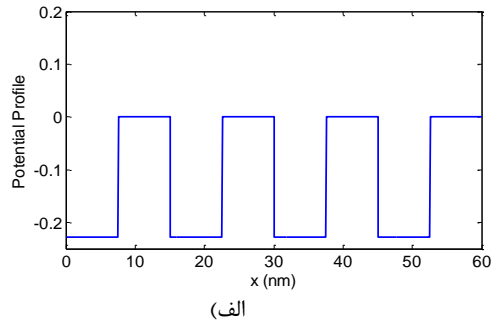
که در آن  $t = \hbar^2 / (2m_e a^2)$  المان ماتریس هاپینگ بین نزدیک ترین همسایه ها،  $m_e$  جرم الکترون،  $N$  تعداد سایت ها،  $a$  ثابت شبکه و  $c_n^\dagger$  عملگر خلق و  $c_n$  عملگر فنا است. پارامتر  $V_n$  مقدار پتانسیل مربعی به عمق  $V_{Conf}$  را نشان می دهد که در طول محیط رینگ اعمال می شود. با قطری کردن هامیلتونی سیستم در معادله (۱) مقادیر ویژه انرژی سیستم بدست می آید. طیف جذبی را میتوان از رابطه زیر بدست آورد [۵]:

ساختارهای شبه رینگ در مقیاس نانو که با عنوان کلی رینگ های کوانتومی شناخته می شوند اخیراً مورد توجه محققان قرار گرفته است. این ساختارهای نانومقیاس نمونه شبیه به بنزن هستند [۱]. آنها دارای چگالی الکترون و تقارن خاصی هستند که منجر به حواص منحصر به فردی مانند جریان پایا که بعلت قانون بقای اندازه حرکت زاویه ای است، می شود. این ساختارها تا کنون بصورت تئوری و تجربی مطالعه شده اند [۲-۳].

خواص فیزیکی و اپتیکی این ساختارها بوسیله روش های مختلفی مانند روش تابع چگالی حالت، روش هارتر-فوک و روش مونت-کارلو، K.P، ماتریس انتقال و روش تنگ بست قابل حل است. ویژگی های انتقال مانند اثر آهارنوف-بوهم، جریان پایا، اثر فانو و... ویژگی هایی هستند که با این روش ها با حضور اثر اسپین - مدار و بدون آن قابل مطالعه هستند. [۴-۶]، تا کنون مطالعاتی روی این ساختارها با حل مستقیم معادله شرودینگر و محاسبه ترازها و یا روش ماتریس حالت انجام شده است [۷-۵]. قبلاً ساختارهایی با طول موثر ثابت شبیه سازی شده است [۸-۹]. اما در این مقاله با استفاده از روش تنگ بست ترازهای انرژی، تابع موج و جذب رینگ های کوانتومی مبتنی بر چاه کوانتومی چند گانه محاسبه شده و اثر تغییر تعداد چاه ها و شعاع رینگ روی این ویژگی ها بدست آمده است. بررسی ویژگی اپتیکی این ساختارها نشان می دهد این که دارای جذب در ناحیه مادون قرمز هستند که دارای کاربردهای صنعتی و پژوهشی فراوانی است. کاربردهای معمول آنها شامل دیدبانی محیط [۱۰، ۱۱]، تشخیص شیمیایی و بیولوژیکی ترکیبات [۱۲]، تصویربرداری حرارتی، دید درشب، تشخیص ناهنجاری و مخابرات فضای آزاد است [۱۳-۱۴]. از گذشته تا کنون تکنولوژی های مختلفی مانند ترکیبات مرکوری-کادمیم-تلوراید<sup>۱</sup> (MCT)، ساختارهای مبتنی بر چاه کوانتومی<sup>۲</sup> و ساختارهای مبتنی بر نقطه کوانتومی برای آشکارسازی در این پنجره استفاده شده است [۱۱-۱۰].

1- Mercury-Cadmium-Telluride (MCT)  
2 -Quantum Well (QW)

به ۴ عدد افزایش یافته است و نتایج در شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل ۳: الف) تابع پتانسیل رینگ کوانتومی شامل ۴ عدد چاه. ب) ترازهای انرژی رینگ کوانتومی ج) تابع موج پایه.

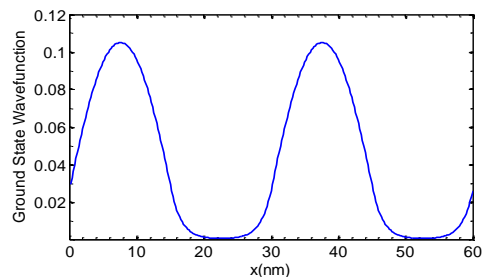
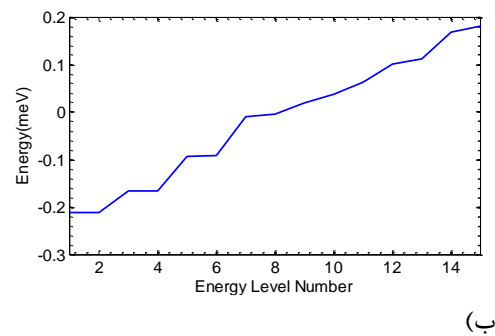
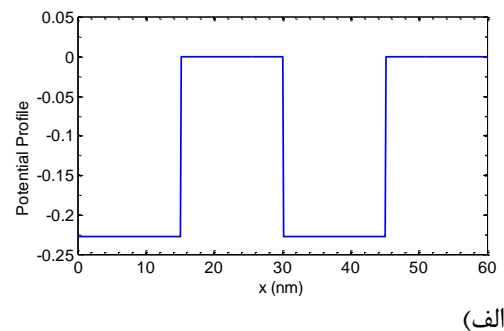
آنطور که شکل (۳) نمایش می دهد تابع موج دارای چهار بیشینه است که برابر تعداد چاهها است یعنی الکترونها بطور متقارن درون چاهها وجود دارند. با افزایش تعداد چاهها ترازهای هم انرژی افزایش یافته است و از طرفی مقدار پرش انرژی در ترازهای مرتبه ۵ تا ۸ خیلی کم است. در ادامه مقدار جذب طبق رابطه (۲) برای این ساختار محاسبه شده و در شکل (۴) نشان داده شده است.

$$A(E) = \frac{1}{N} \sum_{\beta} \delta(E - E_{\beta}) F_{\beta} \quad (2)$$

که در آن  $F_{\beta}$  قدرت نوسانگر مرتبط با مقدار ویژه  $\beta$  است.

### ۳- نتایج شبیه سازی

شبیه سازی برای رینگی با محیط ۶۰ نانومتر متشکل از دو چاه کوانتومی با عرض ۱۵ نانومتر انجام شده و نتایج در شکل (۲) نمایش داده شده است.



ج)

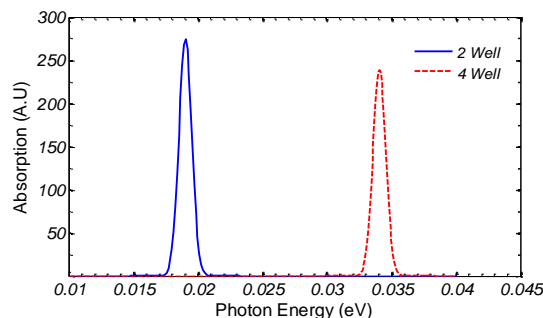
شکل ۲: الف) تابع پتانسیل رینگ کوانتومی شامل ۲ عدد چاه. ب) ترازهای انرژی رینگ کوانتومی ج) تابع موج پایه.

آنطور که شکل (۲) نمایش می دهد مقدار تابع موج در محل چاه دارای بیشینه است یعنی الکترونها درون چاه محصور شده اند. از طرفی مقدار انرژی در ترازهای پایین بطور تدریجی و منظم افزایش پیدا می کند اما با افزایش مرتبه تراز مقدار پرش در انرژی زیاد می شود. در ادامه تعداد چاهها

با افزایش تعداد چاهها یک جایجایی آبی در بیشینه جذب صورت می‌گیرد که با این روش می‌توان محل بیشینه جذبی را بطور دلخواه تنظیم کرد.

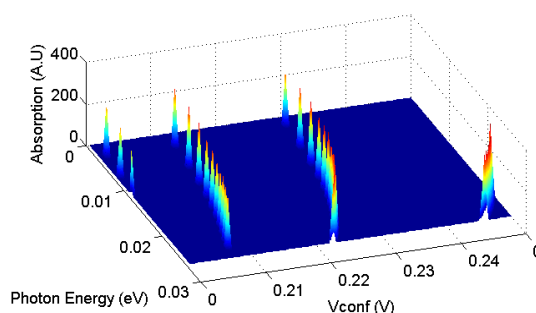
## مراجع

- [1] M. Büttiker, Y. Imry, R. Landauer, Phys. Lett. A 96, 365 (1969).
- [2] N. T. Bagraev, N. G. Galkin, W. Gehlhoff, L. E. Klyachkin and A. M. Malyarenko, J. Phys.: Condens. 20, 164202 (2008).
- [3] M. Solaimani, Chin. Phys. Lett. 32, 117304 (2015).
- [4] S. Jana, N. Bhattacharya, A. Chakrabarti, Physica B 406, 4387 (2011).
- [5] M. Wang and K. Chang, Phys. Rev. B 77, 125330 (2008).
- [6] J. Schelter, P. Recher, B. Trauzettel, Solid State Commun. 152, 1411 (2012).
- [7] Y.-C. Zhou, X.-E. Yang, H.-Z. Li, Phys. Lett. A 190, 123 (1990).
- [8] M. Solaimani, Solid State Commun. 200, 66 (2014).
- [9] M. Solaimani, J. Nonlinear Opt. Phys. Mater. 23, 1450050 (2014).
- [10] S. Pal, K. B. Ozanyan, and H. McCann, A spectroscopic study for detection of carbon-monoxide using mid-infrared techniques for single-pass measurement, in Journal of Physics: Conference Series, pp. 012020, 2007
- [11] U. Willer, M. Saraji, A. Khorsandi, P. Geiser, and W. Schade, *Near-and mid-infrared laser monitoring of industrial processes, environment and security applications*, Optics and lasers in engineering, vol. 44, pp. 699-710, 2006.
- [12] C. Balaras and A. Argiriou, *Infrared thermography for building diagnostics*, J. of Energy and buildings, vol. 34, pp. 171-183, 2002.
- [13] D. Manolakis and G. Shaw, *Detection algorithms for hyperspectral imaging applications*, Signal Processing Magazine, IEEE, vol. 19, pp. 29-43, 2002.
- [14] P. Norton, *Third-generation sensors for night vision*, in Congress on Optics and Optoelectronics, pp. 59571Z-59571Z-15, 2005.



شکل ۴: جذب رینگ کوانتومی با محیط ۶۰ نانومتر شامل ۲ و ۴ عدد چاه کوانتومی.

آنطور که شکل (۴) نمایش می‌دهد با افزایش تعداد چاه از دو به چهار، مقدار جذب ۱۳٪ کاهش یافته است و مقدار قله جذب نیز دارای جایجایی آبی ۱۵ میلی‌الکترون ولت است. در ادامه مقدار جذب برای رینگ کوانتومی شامل ۴ چاه کوانتومی با تغییر پتانسیل محاسبه و در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵: شکل جذب برای رینگ کوانتومی شامل ۴ چاه به ازای مقادیر متفاوت پتانسیل اعمالی مختلف.

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از روش تنگ بست مقادیر ویژه، توابع موج و پارامتر جذب برای یک رینگ کوانتومی شامل چاه کوانتومی چندگانه بدست آمد. آنطور که نتایج نشان می‌دهد ساختار جذب بیشینه‌ای در محدوده مادون قرمز دور دارد که از نظر فناوری دارای کاربرد زیادی است. نتایج نشان می‌دهد