



# A Few-atom-scale Resonant Tunneling Diode with Electric Field Tunable Negative Differential Resistance

Maryam Momeni <sup>a\*</sup>, Majid Sanaeepur <sup>a\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

## Original Article

Use your device to scan and read the article online



**Citation:** Momeni M, Sanaeepur M. A Few-atom-scale Resonant Tunneling Diode with Electric Field Tunable Negative Differential Resistance. *Industrial Innovations*. 2025; 3(1): 22-31.

 <https://doi.org/10.61882/jii.3.1.22>

## KEYWORDS

Resonant Tunneling Diode;  
Atomic Scale;  
Negative Differential Resistance;  
Electric Field.

## ABSTRACT

Resonant tunnelling diodes (RTDs) operate on quantum mechanical phenomenon and are popularly known for exhibiting negative differential resistance (NDR) on their current-voltage characteristics. Here a nanoscale resonant tunneling diode with negative differential resistance characteristics has been proposed. The suggested diode features a monolayer atomic lattice similar to graphene's honeycomb lattice structure, composed of boron, nitrogen, and carbon atoms, and consists of only 18 atoms in total. The proposed device has a quasi-zero dimensional structure due to its ultra small dimensions and benefits from flexibility of two dimensional structures. The current-voltage characteristics of the diode have been obtained through quantum transport simulations using the non-equilibrium Green's function method with a tight-binding Hamiltonian approximation. The I-V characteristic of the proposed device clearly exhibits negative differential resistance behavior with a peak current of 215 picoamperes at a terminal voltage of 40 millivolts. Also it has also been demonstrated that the negative differential resistance characteristics of the diode can be accurately tuned by applying an electric field to the well region or by increasing the well length by multiples of the graphene lattice constant. RTDs possess fast-switching time due to the quantum tunnelling mechanism, which gives attention to ultra-fast switching circuits. In addition, the RTD circuit design is of lower complexity compared to implementing other devices in the same circuit design]. Another advantage of RTD is that a higher PVR not only reflects stronger NDR but also correlates with higher frequency, increased gain, and low power consumption, making RTD highly suitable for oscillators, switching circuits, and amplifiers

## Extended Abstract

### 1. Introduction

The continuous downscaling of metal–oxide–semiconductor (MOS)-based electronic devices over the past few decades has reinforced the prediction that physical limitations to further miniaturization will be reached in the near future. Consequently, extensive research efforts have been devoted to exploring alternative concepts and materials beyond silicon for the fabrication of smaller devices. Resonant tunneling diodes (RTDs), which are two-terminal electronic devices operating based on the quantum tunneling phenomenon, have been proposed as one of the potential replacements for MOS devices, particularly in ultra-high-speed and low-power circuits.

Traditionally, RTDs are fabricated by vertically stacking materials with different energy band structures in the form of heterostructure layers. However, the performance quality of such three-dimensional vertical heterostructures degrades over time due to interface-related issues, such as lattice mismatch and dislocation defects at the junction between different materials. This problem can be significantly mitigated by employing lateral (in-plane) two-dimensional heterostructures based on 2D

\* Corresponding author.

E-mail address: [m-sanaeepur@araku.ac.ir](mailto:m-sanaeepur@araku.ac.ir); [m-momeni@araku.ac.ir](mailto:m-momeni@araku.ac.ir)

DOI: <https://doi.org/10.61882/jii.3.1.22>

Received: August 2, 2025; Received in revised form: September 1, 2025; Accepted: September 2, 2025.

Article type: Research Paper



materials such as graphene. In two-dimensional RTDs, the required band offset for normal operation can be achieved through various methods, including doping, edge decoration or patterning along the transport direction, or by bending the two lateral edges of graphene before connecting them to the terminals. In recent years, several two-dimensional RTDs with nanoscale dimensions have been proposed based on graphene. Some of these devices utilize heterostructures composed of boron, nitrogen, and carbon atoms (BNC). In this study, for the first time, a quasi-zero-dimensional (few-atomic-scale) resonant tunneling diode based on a BNC heterostructure consisting of boron, nitrogen, and carbon atoms is proposed.

## 2. Methodology

In the proposed device, the energy band offset between boron nitride (BN) and graphene is utilized to form a potential well and two potential barriers on either side of it. The device consists of a single hexagonal carbon ring serving as the potential well, sandwiched between two hexagonal BN rings acting as potential barriers. The entire structure is placed on an insulating substrate, and a high- $\kappa$  dielectric layer is positioned above the well region to enable electrical control of the device through gate voltage application. It is assumed that the dielectric constant of the insulator is sufficiently large so that the entire gate voltage is effectively applied to the energy band of the well region. For quantum transport simulations of the proposed device, the tight-binding Hamiltonian is integrated into the transport equations within the NEGF formalism.

## 3. Results

The current–voltage ( $I$ – $V$ ) characteristics of the proposed RTD, obtained by integrating the approximated tight-binding Hamiltonian into the quantum transport equations using the non-equilibrium Green’s function (NEGF) formalism, clearly exhibits negative differential resistance (NDR) behavior. The effect of an external electric field on the NDR characteristics of the diode has also been investigated. Moreover, it is demonstrated that the NDR behavior can be precisely tuned by applying an electric field to the quantum well region. It is shown that by increasing the number of carbon hexagonal rings in the well region, both the peak current and the corresponding terminal voltage can be simultaneously adjusted. Furthermore, it is shown that the peak current and the corresponding voltage can be accurately tuned either by applying an electric field to the quantum well region or by varying the well length. The obtained results suggest that the proposed RTD can serve as a promising candidate for high-frequency and low-power applications, potentially replacing conventional silicon-based devices.



## دیود تونلی تشدید در مقیاس چنداتمی با مقاومت تفاضلی منفی قابل تنظیم توسط میدان الکتریکی

مریم مؤمنی<sup>الف\*</sup>، مجید سنایی پور<sup>ب\*</sup>

<sup>الف</sup> گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران. [m-momeni@araku.ac.ir](mailto:m-momeni@araku.ac.ir)

<sup>ب</sup> گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران. [m-sanaeepur@araku.ac.ir](mailto:m-sanaeepur@araku.ac.ir)

چکیده	واژگان کلیدی
<p>دیودهای تونلی تشدید بر مبنای مکانیک کوانتومی عمل کرده و در مشخصه جریان ولتاژ آنها مقاومت منفی تفاضلی دیده می‌شود. در این مقاله یک دیود تونلی تشدید در مقیاس چنداتمی با عملکرد مبتنی بر مقاومت تفاضلی منفی پیشنهاد شده است. دیود پیشنهاد شده دارای شبکه اتمی تک‌لایه و مشابه با گرافن، متشکل از اتم‌های بور، نیتروژن و کربن و در مجموع تنها شامل ۱۸ اتم می‌باشد. برای بررسی عملکرد دیود، مشخصه جریان-ولتاژ آن از طریق شبیه‌سازی‌های انتقال کوانتومی با استفاده از روش تابع گرین غیر تعادلی با همیلتونی تقریب‌زده شده به روش بستگی محکم به‌دست‌آمده است. دیود پیشنهادی به‌وضوح رفتار مقاومت تفاضلی منفی را با جریان اوج ۲۱۵ پیکوآمپر در ولتاژ ترمینال ۴۰ میلی‌ولت نشان می‌دهد. همچنین نشان داده شده است که مشخصات مقاومت تفاضلی منفی دیود را می‌توان به‌دقت با اعمال میدان الکتریکی بر ناحیه چاه یا با افزایش طول چاه به اندازه مضاربی از ثابت شبکه گرافن تنظیم نمود. دیود پیشنهادی به دلیل جریان اوج بالا و ولتاژ اوج پایین و نیز ابعاد اتمی برای استفاده در کاربردهای توان پایین، فرکانس بالا و مدارهای قابل انعطاف مناسب است.</p>	<p>دیود تونلی تشدید؛ مقیاس چنداتمی؛ مقاومت تفاضلی منفی قابل تنظیم؛ میدان الکتریکی.</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱</p>

### ۱- مقدمه

کوچک شدن پیوسته ابعاد قطعات الکترونیکی بر پایه فلز-اکسید-نیمه‌رسانا<sup>۱</sup> (MOS) در چند دهه گذشته این پیش‌بینی را که در آینده نزدیک به محدودیت‌های فیزیکی در کاهش ابعاد برسیم تقویت کرده است [۱]. از این‌رو، تلاش‌های پژوهشی گسترده‌ای بر روی ایده‌ها و مواد جایگزین سیلیکون برای ساخت قطعات کوچک‌تر متمرکز شده است [۲]. دیودهای تونلی تشدید<sup>۲</sup> (RTDs) که دسته‌ای از قطعات الکترونیکی دو سر هستند و بر اساس پدیده تونل‌زنی کوانتومی<sup>۳</sup> عمل می‌کنند، به‌عنوان یکی از گزینه‌های جانشین احتمالی برای قطعات MOS به‌ویژه در مدارهای فوق‌العاده سریع و کم‌مصرف مطرح شده‌اند [۳-۶]. علاوه بر سرعت بالا و مصرف پایین انرژی، به دلیل وجود مقاومت تفاضلی منفی<sup>۴</sup> (NDR)، مدارهای منطقی پیاده‌سازی شده با RTD ها ساخته نسبت به مدارهایی که با انواع دیگر قطعات ساخته می‌شوند، از پیچیدگی کمتری برخوردارند [۷-۱۰].

<sup>1</sup> Metal Oxide Semiconductor

<sup>2</sup> Resonant Tunneling Diodes

<sup>3</sup> Quantum Tunneling

<sup>4</sup> Negative Differential Resistance

به طور سنتی، دیوده‌های تونلی تشدیدی از روی هم گذاشتن مواد دارای نوار انرژی مختلف به صورت لایه‌های عمودی ساخته می‌شوند. در این حالت یک ساختار ناهمگون<sup>۱</sup> سه‌بعدی تشکیل می‌شود که در آن جهت حرکت حامل‌های بار، در جهت عمود بر سطح مشترک لایه‌های مختلف است [۱۱، ۱۲]. باین حال، کیفیت عملکرد اولیه ساختارهای ناهمگون سه‌بعدی عمودی در گذر زمان به دلیل مسائل مربوط به کیفیت پیوند بین مواد مختلف در محل فصل مشترک<sup>۲</sup> آنها از جمله جابجایی‌ها<sup>۳</sup> و مشکلات عدم تطابق شبکه<sup>۴</sup>، به مرور کاهش می‌یابد [۱۳]. مشکلات مربوط به محل تماس مواد ناهمگون را می‌توان به طور قابل توجهی با استفاده از ساختارهای ناهمگون افقی یا جانبی<sup>۵</sup> دوبعدی مبتنی بر مواد دوبعدی مانند گرافن کاهش داد [۱۳-۱۵]. در دیوده‌های تونلی تشدیدی دوبعدی، اختلاف نوار انرژی لازم برای عملکرد نرمال قطعه از روش‌های مختلفی ایجاد می‌شود که شامل دوپینگ، تزئین<sup>۶</sup> یا الگوگذاری<sup>۷</sup> لایه‌های دیود در راستای طول قطعه (جهت حرکت حامل‌های بار) یا خم کردن دو لایه جانبی گرافن پیش از اتصال به ترمینال‌ها است [۱۶-۱۸]. در سال‌های اخیر، چندین دیود تونلی تشدیدی دوبعدی مبتنی بر گرافن با ابعاد چند نانومتری پیشنهاد شده‌اند [۱۳-۱۹]. برخی از دیوده‌های پیشنهاد شده با استفاده از ساختارهای ناهمگون مبتنی بر اتم‌های بود، نیتروژن و کربن (BNC) بوده است [۱۳-۱۹]. در این مطالعه، برای نخستین بار، یک دیود تونلی تشدیدی در مقیاس چنداتی (شبه‌صفربعدی) مبتنی بر ساختار ناهمگون BNC (شامل اتم‌های بور، نیتروژن و کربن) پیشنهاد شده است (شکل ۱). در قطعه پیشنهادی، از اختلاف نوار انرژی بین نیتريد بور (BN) و گرافن برای ایجاد چاه پتانسیل<sup>۸</sup> و سدهای پتانسیل<sup>۹</sup> در دو طرف آن استفاده می‌شود. مشخصه جریان-ولتاژ دیود تونلی تشدیدی پیشنهادی که از طریق ادغام همیلتونی<sup>۱۰</sup> تقریب‌زده شده با روش بستگی محکم<sup>۱۱</sup> در معادلات ترابرد به روش تابع گرین غیر تعادلی<sup>۱۲</sup> به دست آمده است، به وضوح رفتار مقاومت تفاضلی منفی را نشان می‌دهد. همچنین اثر میدان الکتریکی بر مشخصه مقاومت تفاضلی منفی این دیود بررسی شده است. علاوه بر این نشان داده شده که رفتار مقاومت تفاضلی منفی می‌تواند به دقت با اعمال میدان الکتریکی بر ناحیه چاه کوانتومی تنظیم شود. در نهایت نشان داده می‌شود که با افزایش تعداد حلقه‌های شش‌ضلعی کربنی در ناحیه چاه می‌توان مقدار جریان اوج<sup>۱۳</sup> و ولتاژ ترمینال متناظر را به صورت همزمان تنظیم نمود. ساختار اتمی دیود تونلی تشدیدی پیشنهادی در شکل ۱ (الف) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، قطعه شامل یک حلقه کربنی شش‌ضلعی به‌عنوان چاه پتانسیل است (از این پس با  $N_W=1$  نشان داده می‌شود) که بین دو حلقه BN شش‌ضلعی به‌عنوان سد پتانسیلی جای گرفته است. نمودار نوار انرژی در طول قطعه نیز در شکل ۱ (ب) نشان داده شده است. تشکیل یک ناحیه چاه انرژی در بین دو سد انرژی پتانسیل که لازمه بروز رفتار مقاومت منفی است در نمودار به وضوح دیده می‌شود. ساختار مذکور روی یک بستر عایق قرار گرفته و روی قسمت چاه پتانسیل یک عایق با ضریب دی‌الکتریک بالا قرار گرفته است تا بتوان از طریق اعمال ولتاژ الکتریکی به ناحیه گیت عملکرد قطعه را کنترل نمود (شکل ۱ ج) را ببینید). فرض بر این است که ضریب دی‌الکتریک عایق به اندازه کافی بزرگ باشد که همه ولتاژ اعمال شده به گیت مستقیماً روی نوار انرژی قسمت چاه اعمال شود.

## ۲- مدل مورد استفاده برای شبیه‌سازی ترابرد کوانتومی

برای شبیه‌سازی ترابرد کوانتومی در قطعه پیشنهادی از ادغام همیلتونی بستگی محکم در معادلات ترابرد کوانتومی به روش تابع گرین غیر تعادلی استفاده شده است. در تقریب بستگی محکم، ماتریس همیلتونی ساختارهای BNC با در نظر گرفتن فقط

<sup>1</sup> Heterostructures

<sup>2</sup> Interface

<sup>3</sup> Dislocations

<sup>4</sup> Lattice Mismatch

<sup>5</sup> Lateral Heterostructures

<sup>6</sup> Decoration

<sup>7</sup> Patterning

<sup>8</sup> Quantum Well

<sup>9</sup> Potential Barriers

<sup>10</sup> Hamiltonian

<sup>11</sup> Tight-Binding

<sup>12</sup> Non-Equilibrium Green's Function

<sup>13</sup> Peak Current

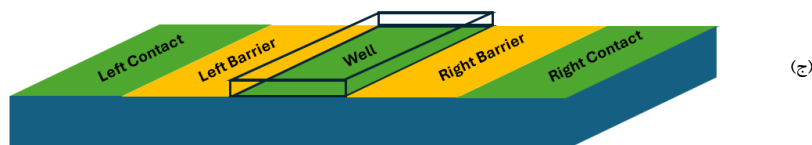
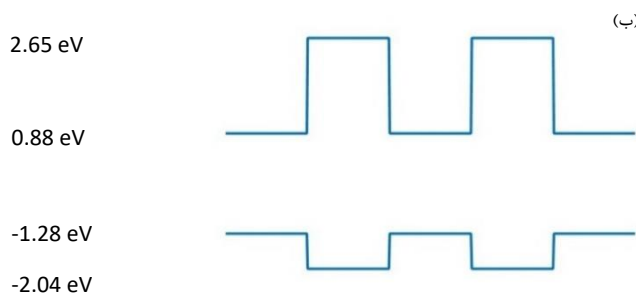
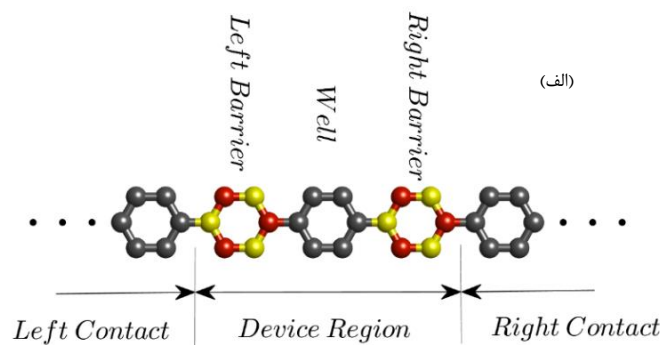
اوربیتال  $p_z$  اتم‌های بور، نیتروژن و کربن نوشته می‌شود [۲۲]. همیلتونی در نمایش دوم کوانتیزه<sup>۱</sup> شده به صورت زیر است:

$$H = \sum_i \varepsilon_i c_i^\dagger c_i + \sum_{\langle i,j \rangle} (\gamma_{i,j} c_i^\dagger c_j + h.c.) \quad (۱)$$

که  $\varepsilon_i, \gamma_{i,j}$  و  $c^\dagger (c)$  انرژی درجا<sup>۲</sup> مربوط به اتم  $i$  ام، پارامتر تونل‌زنی بین دو اتم همسایه  $i$  و  $j$  با کم‌ترین فاصله، و عملگر خلق<sup>۳</sup> (ایجاد) و نابودی<sup>۴</sup> (فنا) فرمیونی را نشان می‌دهند.

انرژی‌های درجا و پارامترهای تونلی در ساختارهای BNC بدین صورت فرض شده‌اند،  $\varepsilon_N = 2.76 \text{ eV}$ ،  $\varepsilon_B = 0 \text{ eV}$ ،  $\varepsilon_C = 0 \text{ eV}$ ،  $\gamma_{B-N} = -2.40 \text{ eV}$  و  $\gamma_{C-N} = -1.70 \text{ eV}$ ،  $\gamma_{C-C} = -2.7 \text{ eV}$ ،  $-1.64 \text{ eV}$  تابع گرین پسرود<sup>۵</sup>  $G(E)$  به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۳]:

$$G(E) = \left( (E + i\eta)I - H_D - \sum_L (E) - \sum_R (E) \right)^{-1} \quad (۲)$$



شکل ۱: (الف) ساختار اتمی دیود تونلی تشدیددی پیشنهادی. اتم‌های بور (B)، نیتروژن (N) و کربن (C) به ترتیب با رنگ‌های قرمز، زرد و سیاه نشان داده شده‌اند. این قطعه از سه حلقه اتمی شش ضلعی تشکیل شده است که یک حلقه کربنی به عنوان چاه پتانسیل بین دو حلقه BN که نقش سد پتانسیلی را ایفا می‌کنند قرار گرفته است. اتصالات دو طرف قطعه به صورت زنجیره‌های نیمه‌نامتناهی از حلقه‌های

<sup>1</sup> Second Quantized Representation

<sup>2</sup> On-site Energy

<sup>3</sup> Creation

<sup>4</sup> Annihilation

<sup>5</sup> Retarded Green's Function

شش ضلعی کربنی در نظر گرفته شده‌اند. (ب) نمودار نوار انرژی دیود پیشنهادی، تشکیل یک ناحیه چاه پتانسیل در بین دو سد پتانسیل در نمودار دیده می‌شود. (ج) ساختار سه‌بعدی قطعه پیشنهادی، شامل یک چاه انرژی پتانسیل در بخش میانی که از جنس کربن است و دو سد انرژی پتانسیل در دو طرف آن از جنس نیتريد بور و اتصالات دو سوی قطعه که از جنس کربن هستند.

که در آن،  $E$  انرژی الکترون است،  $\eta$  یک مقدار بسیار کوچک،  $I$  ماتریس همانی (واحد)،  $H_D$  ماتریس همیلتونی قطعه هستند و  $\Sigma_R$  و  $\Sigma_L$  خودانرژی‌های<sup>۱</sup> اتصالات نیمه‌نامتناهی سمت چپ و راست قطعه هستند که به وسیله روش تکراری سانچو-روبیو محاسبه می‌شوند [۲۴]. ضریب (احتمال) عبور (انتقال) از قطعه،  $T(E)$ ، به صورت زیر به دست می‌آید [۲۵]:

$$T(E) = \text{trace}(\Gamma_L(E)G(E)\Gamma_R(E)G^\dagger(E)) \quad (3)$$

که در آن،  $\Gamma_L$  و  $\Gamma_R$  توابع پهن‌شدگی<sup>۲</sup> اتصالات چپ و راست هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\Gamma_{L,R}(E) = i \left( \sum_{L,R} (E) - \sum_{L,R}^\dagger (E) \right) \quad (4)$$

جریان قطعه به عنوان تابعی از ولتاژ اعمال شده را می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد [۲۲]:

$$I_{LR}(E) = \frac{e}{h} \int_{-\infty}^{+\infty} T(E)(f_L(E) - f_R(E - qV)) \quad (5)$$

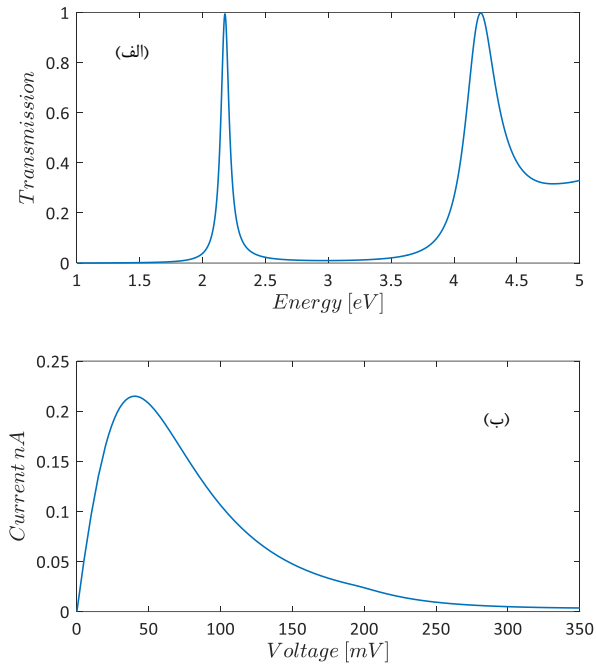
که در آن،  $f_L$  و  $f_R$  توابع توزیع فرمی-دیراک به ترتیب در اتصالات چپ و راست قطعه هستند و  $V$  ولتاژ اعمال شده به ترمینال می‌باشد. دمای اتاق (۳۰۰ کلوین) در تمامی شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است.

### ۳- تحلیل عملکرد دیود تونلی تشدیددی در مقیاس اتمی

ضریب عبور بر حسب انرژی الکترون شامل دو تراز انرژی مجاز پایین‌تر چاه پتانسیل در شکل ۲ (الف) ترسیم شده است. وجود قله‌های عبور در نمودار ضریب عبور بر حسب انرژی امکان بروز رفتار مقاومت منفی را در قطعه ایجاد می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ولتاژ ترمینال قطعه از ۰ تا ۳۵۰ میلی‌ولت، مشخصه جریان-ولتاژ آن به وضوح رفتار مقاومت تفاضلی منفی را نشان می‌دهد (شکل ۲ (ب)).

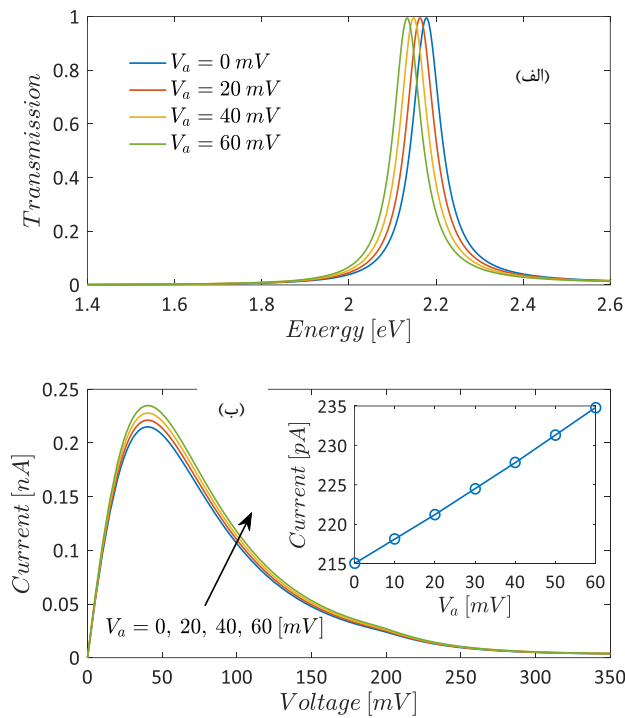
<sup>1</sup> Self-Energy

<sup>2</sup> Broadening Function

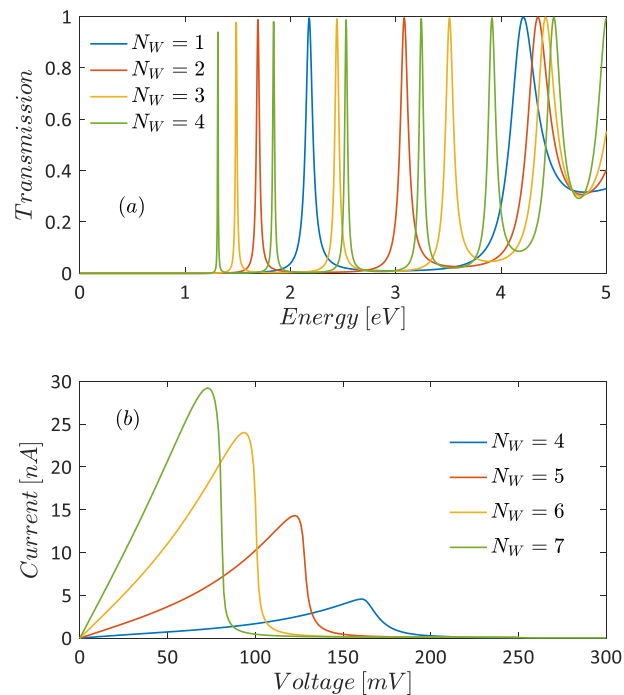


شکل ۲ نمودار عبور برحسب انرژی (الف) و مشخصه جریان-ولتاژ (ب) دییود تونلی تشدیدیی پیشنهادی در ولتاژ اعمال شده  $V_a = 0$

با اعمال ولتاژ روی ناحیه چاه، تمامی ترازهای انرژی چاه از جمله نخستین قله عبور که مربوط به پایین ترین تراز مجاز انرژی چاه است، به سمت انرژی های پایین تر جابه جا می شوند (شکل ۳ الف)). اعمال ولتاژ مثبت بر ناحیه چاه با افزایش نیروی جاذبه وارد بر الکترون ها باعث افزایش پتانسیل جاذب و در نتیجه بستگی محکم تر الکترون ها به ماده می شود. این اثر در نمودار نوار انرژی و در نمودار ضریب عبور به شکل حرکت کل ترازهای انرژی مجاز الکترون به سمت انرژی های پایین تر نمودار می شود. همان طور که در شکل ۳ (ب) مشاهده می شود این پدیده موجب افزایش جریان اوج در دییود می شود. درون نمای شکل ۳ (ب) نشان می دهد که با افزایش ولتاژ اعمال شده به ناحیه چاه از ۰ تا ۶۰ میلی ولت، جریان اوج به صورت خطی از ۲۱۵ پیکوآمپر به ۲۳۵ پیکوآمپر افزایش می یابد. از آنجایی که انرژی ترازهای مجاز در چاه به طور معکوس با طول چاه نسبت دارد، می توان با افزایش تعداد حلقه های کربنی ( $N_W$ )، انرژی نخستین تراز مجاز را نیز کاهش داد. شکل ۴ (الف) نشان می دهد که با افزایش  $N_W$  از ۱ به ۴، اولین قله عبور از ۲.۱۸ الکترون ولت به ۱.۳۱ الکترون ولت جابه جا می شود که این امر به نوبه خود موجب افزایش جریان اوج و کاهش ولتاژ اوج می گردد. مطابق شکل ۴ (ب)، با افزایش طول چاه از ۴ به ۷، جریان اوج از ۴.۵۶ نانوآمپر به ۲۹.۲۲ نانوآمپر افزایش یافته و ولتاژ اوج از ۱۶۰ میلی ولت به ۷۲ میلی ولت کاهش می یابد.



شکل ۳ نمودارهای عبور برحسب انرژی (الف) و مشخصه‌های جریان-ولتاژ (ب) دیود تونلی تشدیدی پیشنهادی برای مقادیر مختلف ولتاژ اعمال شده  $V_a$  در بازه ۰ تا ۶۰ میلی‌ولت. درون‌نمای شکل ۳ (ب) مقدار جریان اوج را در برابر ولتاژ اعمال شده ( $V_a$ ) نشان می‌دهد.



شکل ۴ نمودارهای عبور برحسب انرژی (الف) و مشخصه‌های جریان-ولتاژ (ب) دیود تونلی تشدیدی پیشنهادی برای طول‌های مختلف ناحیه چاه ( $N_W$ ) در شرایطی که ولتاژ اعمال شده  $V_a = 0$  در نظر گرفته شده است.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش یک دیود تونلی تشدیددی در مقیاس چنداتمی و با ابعاد بینهایت کوچک (شبه صفر بعدی) متشکل از اتم های کربن، بور و نیتروژن پیشنهاد شده و عملکرد آن مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. با توجه به ابعاد اتمی قطعه پیشنهاد شده، برای شبیه سازی رفتار آن از محاسبات انتقال کوانتومی در چارچوب تابع گرین غیر تعادلی با هامیلتونی بستگی محکم استفاده شده است. مشخصه جریان-ولتاژ قطعه پیشنهادی در شرایط مختلف به دست آمده است. نتایج به وضوح رفتار مقاومت تفاضلی منفی را در مشخصه  $I-V$  قطعه نشان می دهند. همچنین نشان داده شد که مقادیر جریان اوج و ولتاژ آن را می توان با دقت بسیار خوبی از طریق اعمال میدان الکتریکی بر ناحیه چاه یا با تغییر طول ناحیه چاه تنظیم نمود. نتایج به دست آمده نشان می دهد دیود تونلی پیشنهاد شده را می توان در کاربردهای فرکانس بالا و کم توان به عنوان جایگزین قطعات متداول سیلیکونی به کار برد.

#### ۵- مراجع

- [1] Wong H-S. P. The End of the Road for 2D Scaling of Silicon CMOS and the Future of Device Technology, In 76<sup>th</sup> Device Research Conference (DRC), 2018.
- [2] Schwierz F. Liou J. J. Status and Future Prospects of CMOS Scaling and Moore's Law-A Personal Perspective, In 2020 IEEE Latin America Electron Devices Conference (LAEDC) 2020 Feb 25.
- [3] Mazumder P. Kulkarni S. Bhattacharya M. Sun J. P. and Haddad G. I. Digital circuit applications of resonant tunneling devices, Proceedings of IEEE, 1998;86:664-686.
- [4] Mathews, J. P. Sage, T. C. L. G. Sollner, S. D. Calawa, C. L. Chen, L. J. Mahoney, P. A. Maki and K. M. Molvar R. H. A new RTD-FET logic family, Proceedings of IEEE, 1999;87:596-605.
- [5] Pacha C. Auer U. Burwick C, Glosekotter P. Brennemann A. Prost W. Tegude F. J. and Gosser K. F. Threshold logic circuit design of parallel adders using resonant tunneling devices, IEEE Transactions on Very Large Scale Integrated Circuits, 2000;8:558-572.
- [6] Chang L. L. Esaki L. and Tsu R. Resonant tunneling in semiconductor double barriers, Applied Physics Letters, 1974;24:595.
- [7] Suzuki S. Asada M. Fundamentals and recent advances of terahertz resonant tunneling diodes, Applied Physics Express, 2024;17:070101.
- [8] Cimbri D. Wang J. Al-Khalidi A. Wasige E. Resonant Tunneling Diodes High-Speed Terahertz Wireless Communications - A Review, IEEE Transactions on THz Science and technology, 2022;12:226-244.
- [9] Jéhn Z. Feiginov M. Demonstration of Sub-THz Traveling-Wave Resonant-Tunneling-Diode Oscillators, IEEE Transactions on Nanotechnology, 2023;22:91-101.
- [10] Lee J. Yang K. RF Power Analysis on 5.8 GHz Low-Power Amplifier Using Resonant Tunneling Diodes, IEEE Microwave and Wireless Component Letters, 2017;27:61-63.
- [11] Reed M. A. Vertical electronic transport in novel semiconductor heterojunction structures, Superlattices and Microstructures, 1988;4:6:741-747.
- [12] Seabaugh A. C. Luscombe J. H. Randall J. N. Colter P. C. Dip A. Eldallal G. M. and Bedair S. M. Atomic layer epitaxy for resonant tunneling devices, Thin solid films, 1993;25:225:99-104.
- [13] Sanaeepur M. Jafari MR. and Esmaeili M. Ultrascaled Resonant Tunneling Diodes Based on BN Decorated Zigzag Graphene Nanoribbon Lateral Heterostructures, IEEE Transactions on Electron Devices, 2020;67:2:725-729.
- [14] Goharrizi A. Sanaeepur M. and Sharifi MJ. Improving performance of armchair graphene nanoribbon field effect transistors via boron nitride doping." Superlattices and Microstructures 85 (2015): 522-529.
- [15] Esmaeili M. Jafari MR. and Sanaeepur M. Negative differential resistance in nanoscale heterostructures based on zigzag graphene nanoribbons anti-symmetrically decorated with BN, Superlattices and Microstructures, 2020;145:106584.

- [16] Xiao Z. Ma C. Huang J. Liang L. Lu W. Hong K. Sumpter B. G. Li A. P. and Bernholc J. Design of atomically precise nanoscale negative differential resistance devices, *Advanced Theory and Simulations*, 2019;2:2:1800172.
- [17] Teong H. Lam K. T. Liang G. A computational study on the device performance of graphene nanoribbon resonant tunneling diodes, *Japanese Journal of Applied Physics*, 2009;20:48: 04C156.
- [18] Zhang Z. Z. Chang K. and Chan K. S. Resonant tunneling through double-bended graphene nanoribbons, *Applied Physics Letters*, 2008;11:93:062106,2008.
- [19] Wakai T. Sakamoto S. and Tomiya M. I-V characteristics of graphene nanoribbon/h-BN heterojunctions and resonant tunneling, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2018;6:30265302.
- [20] Monfared MH. and Hosseini E. New methods to increase PVR in gate controllable armchair graphene-boron nitride RTDs, *Optical and Quantum Electronics*, 2024;56:4:698.
- [21] Kharwar S. Singh S. and Jaiswal N.K. First-principles investigations of N-vacancy induced zigzag boron nitride nanoribbons for nanoscale resonant tunneling applications. *Journal of Electronic Materials*, 2021;50:10:5664-5681.
- [22] Yoshioka T. Suzuura H. and Ando T. Electronic states of BCN alloy nanotubes in a simple tight-binding model, *Journal of the Physical Society of Japan*, 2003;72:10:2656-64,2003.
- [23] Datta S. *Quantum transport: atom to transistor*, Cambridge university press, 2005.
- [24] Sancho M. P. L. Sancho J. M. L. Rubio J. Quick iterative scheme for the calculation of transfer matrices: Application to Mo (100), *Journal of Physics F Metal Physics*, 1984;14:1205.
- [25] Sanaeepour M. Abedi A, Sharifi MJ. Performance analysis of nanoscale single layer graphene pressure sensors, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2017;64:1300-1304.