

«مقاله پژوهشی»

## مدل سازی ترانزیستور اثر میدانی گرافینی با کانال شامل دو نقطه کوانتومی جفت شده

حکیمه محمدپور\*

دانشیار، گروه فیزیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

تاریخ پذیرش: 1401/11/15

تاریخ دریافت: 1401/10/16

## Modeling Graphene-based Resonant Tunneling Filed Effect Transistor with two Coupled Quantum Dots

H. Mohammadpour\*

Associate Professor, Department of Physics, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

Received: 2023/01/06

Accepted: 2023/02/04

### Abstract

In this paper, a new Graphene-based field effect transistor (FET) with resonant tunneling transport is introduced and modeled which is also applicable for many other non-graphene, flat two dimensional structures with energy gap. As like other graphene-based FETs, the current passes through semiconducting 2D GNR. But here by adopting P-type source and drain as well as a special geometry of gate contact, the GNR channel is turned into two coupled quantum dots in series. The coupling between Dots and sizes of Dots determine the current characteristic of the device. Resonant tunneling is observed in current-voltage characteristic of the device.

### Keywords

Quantum Dot, Field Effect Transistor, Graphene, Resonant Transport

### چکیده

در این مقاله یک نوع ترانزیستور گرافینی اثر میدانی جدید با ترابرد تونل زنی تشدید می معرفی و مدل سازی می شود که برای بسیاری از ساختارهای غیرگرافینی دوبعدی مسطح هم که دارای نوار ممنوعه انرژی هستند، قابل کاربرد است. همانند سایر ترانزیستورهای اثر میدانی بر پایه گرافین، جریان از طریق نوار دو بعدی گرافینی برقرار می شود. اما در اینجا با انتخاب منبع و درین نوع P و نیز هندسه ویژه الکتروود گیت، کانال گرافینی، به دو نقطه کوانتومی تبدیل می شود که به صورت سری به هم متصل هستند. شدت جفت شدگی بین دو نقطه کوانتومی و اندازه این نقاط، مشخصه جریان کانال را تعیین می کنند. تونل زنی تشدید در مشخصه جریان-ولتاژ سیستم مشاهده می شود.

### واژه های کلیدی

نقطه کوانتومی، ترانزیستور اثر میدانی، گرافین، ترابرد تشدید

## مقدمه

کاربرد نقاط کوانتومی در ادوات الکترونیکی و اپتوالکترونیکی مانند ترانزیستورهای اثر میدانی و فتودتکتورها بر مبنای ترانزهای گسسته انرژی نقاط کوانتومی است [1-6]. به ویژه ادوات نانوالکترونیک بر پایه نقاط کوانتومی، از ترابرد تشدید الکترون‌ها از طریق ترانزهای گسسته و مقاومت دیفرانسیلی منفی بهره می‌برند که کاربرد گسترده‌ای در الکترونیک دیجیتال و آنالوگ دارد [7-9]. ترانزیستورهای اثر میدانی نورگسیل که در ارتباطات نوری، پالس‌های الکتریکی را به سیگنال نوری تبدیل می‌کنند و در فتوترانزیستورها طیف مشخصی از نور را جذب می‌کنند، از جمله ادوات نوینی هستند که از گسستگی ترانزهای انرژی، بهره می‌برند [10-12]. در بین تعداد زیاد ادوات شامل نقاط کوانتومی، ترانزیستورهای اثر میدانی گرافینی قرار دارند [2 و 13-16].

ترابرد بالستیک حامل‌ها در صفحه گرافینی که دارای تحرک‌پذیری بالایی هستند در کنار ساختار دوبعدی مسطح گرافین، ادوات بر پایه نقاط کوانتومی گرافینی را کاندیدای مناسبی برای کاربرد در نانوالکترونیک با ترابرد کوانتومی کرده است. در فتوترانزیستورهای گرافینی، محدود بودن حامل‌ها توسط نوار گرافینی دو بعدی، منجر به طیف پاسخ اپتیکی با قله‌های تیز می‌شود که ناشی از ترانزهای گسسته انرژی است. این ترانزهای گسسته انرژی نقاط کوانتومی، علت ترابرد تشدید و مقاومت دیفرانسیلی منفی در نانوالکترونیک سرعت-بالا است. در کارهای قبلی ما، کانال نقطه کوانتومی ترانزیستور بر روی گرافین، با نوع دیگری از مهندسی کانال، تشکیل شده است [3و2]. گسستگی اسپینی ترانزهای انرژی در حضور جفت‌شدگی اسپین-مدار هم در برخی از تحقیقات، به ترابرد تشدید حامل‌ها انجامیده است [17 و 18].

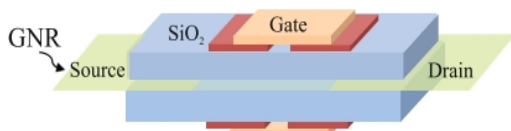
در ترانزیستور جدیدی که در این مقاله مدل‌سازی و معرفی می‌شود با استفاده از ساختار اصلی سه پایانه‌ای ترانزیستور اثر میدانی بر روی گرافین، ناحیه کانال به دو نقطه کوانتومی جفت‌شده به صورت سری، تبدیل می‌شود. در این مدل، تبدیل کانال به دو نقطه کوانتومی از طریق انتخاب نوع متفاوت حامل‌های کانال (n) با منبع و درین (p) و مهندسی ساختار الکترود گیت انجام می‌شود. هندسه و اساس ساختاری این ترانزیستور در بخش بعدی ارائه

می‌شود. جفت‌شدگی بین نقاط کوانتومی و در نتیجه بین ترانزهای انرژی آن دو، اساس عملکرد این ترانزیستور است.

## مدل و رهیافت شبیه‌سازی

طرحواره ترانزیستور مدل‌سازی شده را در شکل 1 می‌بینیم. این یک ترانزیستور اثر میدانی گرافینی فلز-اکسید-نیم‌رسانا (ماسفت) است که نحوه اتصال الکترود گیت آن، کمی تغییر کرده است. به علاوه، ناخالصی منبع و درین، به صورت نوع p در نظر گرفته می‌شود. این تغییر منجر به تشکیل دو نقطه کوانتومی در کانال ترانزیستور مدل می‌شود که آن را ترانزیستور اثر میدانی دو نقطه کوانتومی می‌نامیم و با pnpn مشخص می‌کنیم که نشان دهنده نوع ناخالصی‌های منبع، دو نقطه کوانتومی کانال و درین است. همانند سایر ترانزیستورهای اثر میدانی گرافینی، ناحیه ترابرد بار الکتریکی که شامل کانال و دو ناحیه منبع و درین است بر روی یک نانو نوار گرافینی آرمچیر تعبیه شده است. در این ساختار مدل، نانونوار گرافینی آرمچیر با تعداد 13 اتم کربن در راستای عرض، با انرژی نوار ممنوعه تقریبی 0/72 الکترون-ولت، استفاده می‌شود. نواحی منبع و درین با رسانندگی بالا و چگالی حالات الکترونی زیاد در نوار ظرفیت واقع در محل انرژی فرمی، از ناخالص کردن دو انتهای نانو نوار گرافینی ایجاد می‌شوند.

این نانونوار گرافینی که دربرگیرنده نواحی منبع-کانال-درین است از بالا و پایین سطح نوار، بین دو لایه دی‌الکتریک  $\text{SiO}_2$  با ثابت دی‌الکتریک  $k = 3.9$  و ضخامت 0/8 نانومتر قرار می‌گیرد.



شکل 1. طرحواره ترانزیستور اثر میدانی گرافینی pnpn دو نقطه کوانتومی

ساختار ترانزیستور گرافینی در بالا و زیر نوار، متقارن است و به همین علت، فقط بالای ساختار توضیح داده می‌شود. در این ساختار که با ایجاد خازن ماس (فلز-اکسید-نیم‌رسانا) کار می‌کند به سبب پوشش کانال توسط ولتاژ

دلیل دربرگرفتن نواحی منبع و درین، دارای ابعاد بی‌نهایت است. برای احتراز از این ابعاد، هامیلتونی را به ناحیه کانال محدود می‌کنیم و در مقابل، خودانرژی‌های منبع  $\Sigma_L(or s)$  و درین  $\Sigma_R(or d)$  را به آن اضافه می‌کنیم.

$$G(E) = [(E + i\eta)I - H - U - \Sigma_R - \Sigma_L]^{-1} \quad (2)$$

که در آن

$$\begin{aligned} \Sigma_{R(L)} &= \tau g_{R(L)} \tau^\dagger, \\ g_{R(L)} &= [(E + i\eta)I - H_{R(L)}]^{-1} \end{aligned} \quad (3)$$

$H_{R(L)}$  هامیلتونی سلول واحد در درین (منبع) است. پهن‌شدگی ترازهای انرژی کانال از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\Gamma_s(d) = i(\Sigma_s(d) - \Sigma_s^\dagger(d)) \quad (4)$$

در فرمول‌بندی لاندائو، جریان از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$I = \frac{2e}{\hbar} \int_{-\infty}^{+\infty} dE T(E) (f_s(E) - f_d(E)) \quad (5)$$

که در آن تابع عبور از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T(E) = Tr[\Gamma_s G \Gamma_d G^\dagger] \quad (6)$$

### نتایج

ابتدا نمادهای به کار رفته برای پارامترهای قطعه مدل شده را معرفی می‌کنیم.  $V_D$  و  $V_G$  به ترتیب، ولتاژهای گیت و درین (بر حسب ولت) هستند با فرض این که ولتاژ الکتروود منبع صفر است. قرارداد ما در این مقاله بر این است که هر طولی در امتداد کانال نوار گرافینی را بر حسب تعداد سلول واحد قراردادی نوار بیان می‌کنیم. سلول واحد قراردادی نوار گرافینی، مستطیلی است به عرض یک حلقه نوار بنزن در راستای طول کانال و طول این مستطیل قراردادی، شامل تمام اتم‌های کربن در راستای عرض نوار است. با این بیان، نوار گرافینی را می‌توان یک زنجیر یک بعدی از این سلول‌های واحد قراردادی در نظر گرفت. در نتیجه، فاصله بین دو سلول قراردادی حدود 0/43 نانومتر است.

ناحیه شبیه‌سازی شده شامل 20 سلول واحد در نواحی منبع (S) و درین (D) است ( $N_{S(D)}$ ). طول کانال جریان که با  $N_{Ch}$  نشان می‌دهیم، مقادیر مختلف می‌تواند داشته باشد که خود، شامل طول نقاط کوانتومی  $N_{D1}$ ،  $N_{D2}$  و طول سد

گیت از بالا و پایین، کنترل جریان کانال توسط ولتاژ گیت، بهتر است و در بسیاری از مقالات تحقیقاتی مورد استفاده قرار گرفته است. جنبه نوآوری مقاله حاضر، در نوع ساختار pnpn برای عبور حامل‌ها از طریق نوع ناخالصی‌های انتخابی متفاوت از کانال، برای منبع و درین و نیز طراحی الکتروود گیت به گونه‌ای است که کانال الکترونی بین منبع و درین به دو نقطه کوانتومی تبدیل می‌شود.

همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است، الکتروود گیت مستقیم بر روی لایه عایق قرار نمی‌گیرد بلکه دو صفحه فلزی جدا از هم با فاصله‌ای از هم بر روی دی الکترونیک قرار دارند. تک الکتروود گیت بر روی این دو صفحه قرار می‌گیرد. در این ساختار به دلیل تماس فلز الکتروود گیت با این دو صفحه فلزی، هر سه فلز، هم-پتانسیل می‌شوند و در نتیجه با اعمال ولتاژ به الکتروود گیت، این ولتاژ در دو صفحه فلزی هم برقرار می‌شود. به این ترتیب با اعمال ولتاژ گیت، در دو ناحیه از نوار گرافینی در زیر صفحات فلزی، سطح انرژی فرمی بالا می‌رود و این دو ناحیه رسانا می‌شوند. با توجه به ناخالصی نوع p در منبع و درین و تراورد الکترون‌ها از نوار رسانش در کانال، سدهای پتانسیل در دو ناحیه اتصال کانال به سوس و درین برقرار می‌شود. این دو سد به همراه سدی که بین دو صفحه فلزی، به همین ترتیب تشکیل شده، به ایجاد دو ناحیه نقطه کوانتومی بین سدها منجر می‌شود.

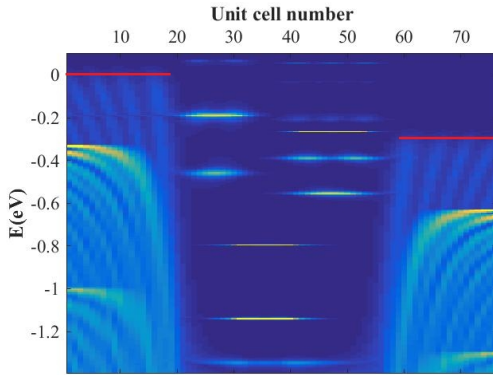
چگالی بار کانال، توزیع پتانسیل و جریان عبوری از آن، از حل معادلات گرین غیرتعادلی (NEGF) و معادله پواسون به دست می‌آیند [19]. هامیلتونی کانال در معادلات گرین غیرتعادلی، در فضای حقیقی و در تقریب مدل تنگ بست بین فقط همسایگان اول به صورت  $H = \sum_{i,j} t \delta_{i,j} \pm 1$  (با انرژی پرش  $t = 2.7eV$ ) نوشته می‌شود [20].

در روش توابع گرین غیر تعادلی، تابع گرین تأخیری از رابطه زیر تعیین می‌شود،

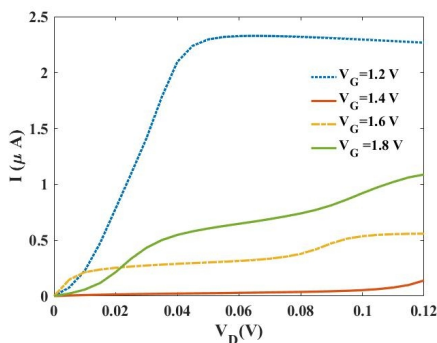
$$G(E) = [(E + i\eta)I - H - U]^{-1} \quad (1)$$

که در آن،  $E$  انرژی و  $\eta = 10^{-4}(eV)$  یک عدد کوچک است.  $U$  ماتریس قطری شامل عناصر پتانسیل در هر سلول واحد است. هامیلتونی به کار رفته در معادله بالا به

داخل کانال، ترازها توزیع یکسان در دو ناحیه از کانال ندارند.



شکل 3. چگالی حالات موضعی در طول کانال بر حسب انرژی به ازای پارامترهای شکل 2. مکان انرژی فرمی در نواحی منبع و درین با خطوط قرمز مشخص شده است. از آنجا که طول نقاط کوانتومی متفاوت انتخاب شده‌اند، ترازهای گسسته انرژی در هر نقطه کوانتومی متفاوت از دیگری توزیع شده‌اند. بنابراین تراورد الکترونی یا جریان کانال، فقط از طریق ترازهایی برقرار می‌شود که در هر دو نقطه کوانتومی هم انرژی هستند و در نتیجه پارامترها و متغیرهای ترانزیستور، تعیین می‌کنند که آیا جریان در طول کانال برقرار باشد یا نه. پهنای سد پتانسیل داخل کانال، میزان منزوی بودن هر نقطه کوانتومی و در نتیجه مقدار پهن‌شدگی ترازهای انرژی کانال شامل نقاط کوانتومی را مشخص می‌کند. در شکل 4، مشخصه جریان-ولتاژ درین به ازای مقادیر متفاوت  $V_G$  رسم شده است.



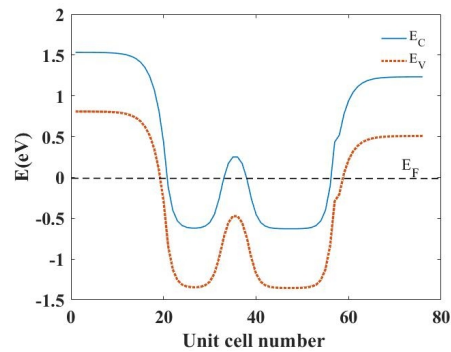
شکل 4. نمودارهای  $I - V_D$  به ازای ولتاژ گیت‌های مختلف

بین دو نقطه کوانتومی،  $N_B$  است. به این ترتیب برای طول کانال داریم:  $N_{Ch} = N_{D1} + N_{D2} + N_B$ .

پارامترهای زیر را در نظر می‌گیریم:

$$N_{Ch} = 36, N_{D1} = 12, N_{D2} = 18, N_B = 6$$

نوارهای رسانش و ظرفیت را در شکل 2 رسم کرده‌ایم. سدهای پتانسیل تشکیل شده بین کانال و نواحی منبع و درین و نیز در داخل کانال، بین دو ناحیه رسانا (نقاط کوانتومی) را مشاهده می‌کنیم.

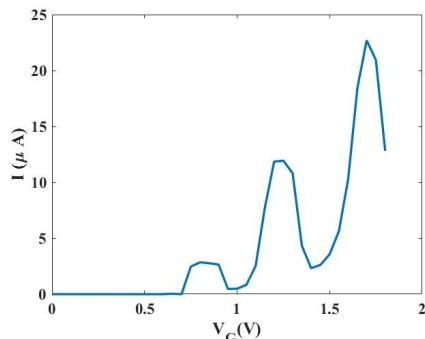


شکل 2. نوارهای رسانش و ظرفیت به ازای  $V_D = 0.3V$  و  $V_G = 1.6V$ .

نمودار رنگی از چگالی حالات موضعی در طول کانال را به صورت تابعی از انرژی در شکل 3 رسم کرده‌ایم. ترازهای گسسته انرژی در نواحی کوانتومی مشخص هستند. در این شکل، نواحی با رنگ روشن، دارای ترازهای انرژی مجاز هستند و نواحی آبی تیره، خالی از تراز انرژی سیستم می‌باشند. چند نکته مهم قابل برداشت است. اول اینکه در نواحی منبع و درین که مملو از ترازهای انرژی هستند، به دلیل یک بعدی بودن نوار گرافینی، ترازهای نسبتاً پیوسته در این دو ناحیه، تکنیکی‌های ون-هوف مورد انتظار در سیستم‌های کوانتومی یک-بعدی را نشان می‌دهند.

نکته دوم، اختلاف سطح انرژی‌های بین دو ناحیه منبع است که به اندازه ولتاژ درین است (به دلیل اینکه ولتاژ منبع صفر انتخاب شده، ولتاژ درین، همان اختلاف ولتاژ بین منبع و درین است).

نکته مهم آخر، وجود ترازهای گسسته انرژی در ناحیه کانال است که ناشی از محدودیت سه بعدی این ناحیه است که البته به دلیل ابعاد متفاوت دو ناحیه سمت راست و چپ

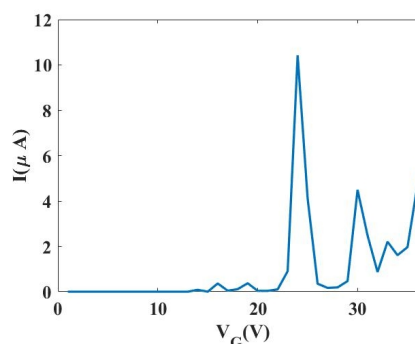


شکل 6. نمودارهای  $I - V_G$  در ولتاژ درین 0/1 ولت

### بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی جدیدی برای ترانزیستور اثر میدانی گرافینی ارائه شده است که بر خلاف مدل‌های متداول ترانزیستورهای مبتنی بر گرافین، فلز گیت، دو ناحیه جدا از هم از کانال را پوشش می‌دهد. در این ساختار با توجه به اثر گیت بر روی دو ناحیه مجزا، سدی در کانال بین این دو ناحیه تشکیل می‌شود. به علاوه، بخاطر نوع ناخالصی p، دو سد پتانسیل دیگر هم در محل اتصال کانال به منبع و درین تشکیل می‌شود. بنابراین، دو ناحیه محدود به شکل نقطه کوانتومی در کانال تشکیل می‌شوند که دارای ترازهای انرژی گسسته هستند. ترابرد الکترونی یا جریان کانال، از طریق تونل‌زنی تشدیدی از طریق این ترازهای انرژی صورت می‌گیرد.

همان‌طور که در نمودار دیده می‌شود با افزایش پارامتر ولتاژ گیت، جریان افزایش پیدا نمی‌کند که این نشانه‌ای از ترابرد الکترون‌ها از طریق ترازهای گسسته انرژی است. در شکل 5، نمودار جریان محاسبه شده، به صورت تابعی از ولتاژ گیت به ازای ولتاژ درین 0/02 ولت رسم شده است. این نمودارها که دارای قله‌هایی هستند، مقاومت دیفرانسیلی منفی جریان بر حسب ولتاژ گیت دارند یعنی در بازه‌هایی از ولتاژ گیت، با افزایش ولتاژ، جریان کاهش می‌یابد. این از مشخصات جریان سیستم کوانتومی با ترابرد تشدیدی است.



شکل 5. نمودارهای  $I - V_G$  در ولتاژ درین 0/02 ولت

در شکل 6، نمودار جریان محاسبه شده، به ازای ولتاژ درین 0/1 ولت به صورت تابعی از ولتاژ گیت رسم شده است.

### منابع

- [1] M. Moradinasab, M. Pourfath, Numerical study of graphene superlattice-based photo-detectors, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 62, no. 2, (2015) 593-600.
- [2] H. Mohamadpour and A. Asgari, Graphene nanoribbon tunneling field effect transistors, Physica E 46 (2012) 270-273.
- [3] H. Mohammadpour, Quantum dot resonant tunneling FET on graphene, Physica E 81 (2016) 91-95.
- [4] S. Kahmann, A. Shulga, Quantum dot light emitting transistors, Advanced Functional Materials (2020).
- [5] F. Hetsch, N. Zhao, Quantum dot field effect transistors, Materials Today, Vol. 16, Issue 9 (2013) 312-325.
- [6] J. Chen, MA. Reed, Large on-off ratios and negative differential resistance in a molecular electronic device, JM Tour, Science, (1999) 286(5444):1550-1552.
- [7] H. Agarwal, P. Kushwaha, Engineering negative differential resistance in ncfetsfor analog applications, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 65, no. 5 (2018) 2033- 2039.
- [8] G. J. Ferreira, M. N. Leuenberger, Low-bias negative differential resistance in graphene nanoribbon superlattices, Phys. Rev. B 84 (2011) 125453.
- [9] X. Chin, D. Cortecchia, Lead iodide perovskite light-emitting field effect transistors, Nat Commun 6 (2015) 7383.
- [10] J. H. Schön, A. Dodabalapur, A light-emitting field effect transistor, Science (2000) 290 (5493): 963-6.

- [11] DK.Kim, J. Choi, Low-voltage organic light-emitting field-effect transistors using n-dodecylphosphonic acid-passivated  $\text{hfo}_x$  dielectrics, *Organic Electronics*, Vol. 51 (2017) 287-294.
- [12] R. Li, L. Schneider, Gate tuning of forster resonance energy transfer in a graphene-quantum dot fet photodetector, *Sci Rep* 6 (2016) 28224.
- [13] H. Kalita, V. Harikrishnan, Field effect transport properties of electrochemically prepared graphene quantum dots, *IEEE 5th International Nanoelectronics Conference (INEC)* (2013) 463-465
- [14] F. Hetsch, N. Zhao, Quantum dot field effect transistors, *Materials Today*, Vol. 16.9 (2013) 312-325.
- [15] G. Konstantatos, M. Badioli, Hybrid graphene-quantum dot phototransistors with ultrahigh gain, *Nat. Nanotechnol.* 7 (2012) 363-368.
- [16] M. I. Alomar, L. Serra, Interplay between resonant tunneling and spin precession oscillations in all-electronic all-semiconductor spin transistors, *Phys. Rev. B* 94 (2016) 075402.
- [17] J. Pawłowski, G. Skowron, Spin-selective resonant tunneling induces by rashba spin-orbit interaction in semiconductor nanowire, *Phys. Rev. Applied* 15 (2021) 054066.
- [18] R. Akter, N. Islam, Implementation of reversible logic gate in quantum dot cellular automata, *International Journal of Computer Applications* (0975 – 8887) Vol. 109, 1 (2015).
- [19] KI. Bolotin, KJ. Sikes, Ultrahigh electron mobility in suspended graphene, *Solid state communications* 146.9-10 (2008): 351-355.
- [20] R. Lake, G. Klimeck, Single and multi-band modeling of quantum electron transport through layered semiconductor devices, *Journal of Applied Physics* 81.12 (1997): 7845-7869.

## COPYRIGHTS



© 2022 by the authors Licensee PNU, Tehran, Iran This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4 0 International (CC BY4 0) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)