

# بررسی تأثیر پارامترهای ناهمواری بر مشخصه جریان-ولتاژ دیودهای تونل‌زنی تشدید

ژاله ابراهیمی نژاد\*؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، گروه فیزیک  
رضا ثابت داریانی؛ دانشگاه الزهراء، دانشکده فیزیک  
سید فرهاد مسعودی؛ دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده فیزیک

دریافت: ۹۴/۵/۱۹

پذیرش: ۹۶/۱۰/۲

## چکیده

در این مقاله، تأثیر پراکندگی الکترون، به دلیل حضور فصول مشترک ناهموار، بر رسانش الکتریکی در ساختارهای تونل‌زنی بررسی شده است. ساختار تونل‌زنی یک پنج لایه‌ای (دوسدی) است که تمامی لایه‌ها نیمه رسانا هستند. محاسبات در چارچوب الکترون نسبتاً آزاد و روش ماتریس انتقال انجام شده است. تأثیر پارامترهای مختلف ناهمواری شامل ارتفاع ناهمواری، طول همبستگی و نمای زبری بر رسانش الکتریکی در دمای صفر مطالعه شده است. نتایج امان نشان داد که افزایش ناهمواری منجر به افزایش پراکندگی الکترون‌های فرودی می‌گردد و همچنین باعث کاهش یافتن احتمال عبور الکترون‌ها و در نتیجه، کاهش ترابرد الکتریکی از ساختارهای تونل‌زنی می‌شود. از طرف دیگر با افزایش نمای زبری، ناهمواری‌های سطح نرم‌تر شده و فصول مشترک، نسبت به نماهای زبری بزرگ‌تر، کمتر ناهموار به نظر می‌رسند. تأثیر مربوط به تغییر بیش از یک مشخصه ناهمواری بر جریان تونل‌زنی منجر به نتایج جالبی شده است که می‌تواند در ساخت قطعات الکترونیکی مورد توجه قرار گیرد.

**واژگان کلیدی:** ناهمواری، مشخصه ی جریان-ولتاژ، دیود تونل‌زنی تشدید، پراکندگی الکترون.

## مقدمه

خواص ترابردی در ساختارهای کاملاً نیمه رسانا به دلیل کاربرد در ادوات الکترونیکی در چند دهه‌ی اخیر بسیار مورد توجه بوده است [۱-۴]. این امر بخصوص در ساختارهای دوسدی که به عنوان دیودهای تونل‌زنی تشدید کاربرد دارند، مورد توجه کارهای تجربی و نظری به صورت بررسی تأثیر ناهمواری، دماهای متفاوت و ضخامت سدهای کوانتومی مورد توجه قرار گرفته است. [۵-۶] ساختارهای دوسدی، نخستین بار توسط ایساک و تسو در سال ۱۹۷۰ پیشنهاد شدند که در آن لایه‌هایی از GaAs و  $Al_xGa_{1-x}As$  با روش رشد مولکولی هم‌بافت رشد یافتند [۷]. از کاربردهای کلیدی ابزاری که بر اساس ساختارهای دوسدی ساخته می‌شوند می‌توان به عنوان مثال به تولید نوسانات میکروویو [۸] و سوییچ‌های الکترونیکی سریع [۹] اشاره نمود. یکی از کمیت‌هایی که با اندازه‌گیری آن می‌توان به عملکرد خوب یک ابزار الکترونیکی

\*نویسنده مسئول: zhl.ebrahimi@gmail.com

پی برد نسبت قله به دره<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. این نسبت، نرخ بیشینه جریان (قله جریان) به کمینه ی آن (دره ی جریان) در دوطرف منطقه‌ی مقاومت مغناطیسی<sup>۲</sup> منفی است. در عمل، مقادیر بزرگ این کمیت مطلوب است. دلیل این رفتار در دیویدهای تونل زنی تشدیدی به شرح زیر است. زمانی که الکترون با انرژی متنظر با حالات مقید چاه کوانتمی به ساختار دوسدی وارد می‌شود، حداکثر احتمال تونل زنی را دارا بوده و این منجر به ظاهر شدن یک قله در مشخصه‌های جریان-ولتاژ ( $I-V$ ) می‌شود. با افزایش ولتاژ اعمالی جریان به بیشینه مقدار خود رسیده و پس از آن به یک منطقه مقاومت دیفرانسیلی منفی کاهش می‌یابد. برخی از ساده سازی‌ها و در نظر نگرفتن یک سری از عوامل موثر بر مشخصه‌ی جریان-ولتاژ در محاسبات سبب می‌شود که نرخ قله به دره در ابزار واقعی بسیار کمتر از محاسبات نظری باشد [۱۰]. یکی از این عوامل تأثیرگذار، پراکندگی به واسطه‌ی ناهمواری فصول مشترک ساختارهای تونل‌زنی است.

در کارهای بسیاری تأثیر ناهمواری فصول مشترک بر تراپرد در ساختارهای نامتجانس و چاه‌های کوانتمی به صورت تجربی و نظری مطالعه شده است [۱۱-۱۴]. برای مدل کردن ناهمواری فصل مشترک در کارهای نظری از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. از مدل‌های مرسوم برای نشان دادن ناهمواری در سطوح و فصل‌های مشترک می‌توان به نظریه اختلال و قاعده‌ی طلایی فرمی [۱۵]، تابع گرین و نظریه بستگی قوی [۱۶] و روش ماتریس انتقال [۱۶-۱۵] اشاره کرد. در سیستم‌هایی که ناهمواری فصول مشترک در نظر گرفته می‌شود، منحنی مشخصه‌ی جریان-ولتاژ نامتقارن شده و نرخ قله به دره نیز انتظار می‌رود که تغییر کند.

در کار حاضر، تأثیر ناهمواری بر رسانش الکتریکی و مشخصه‌ی جریان-ولتاژ در حالی بررسی شده است که ناهمواری با مدل همبستگی<sup>۳</sup>  $K$  نشان داده می‌شود. استفاده از این مدل به‌جای مدل‌های مصنوعی که توابع خاص و منظمی به ناهمواری فصل مشترک نسبت می‌دهند [۱۵]، این امکان را فراهم می‌سازد که تأثیر تمامی مشخصه‌های ناهمواری را بر تراپرد الکترون از میان ساختارهای سد و چاه کوانتمی مطالعه نمود. مشخصه‌های کلی ناهمواری که یک سطح/فصل مشترک را مشخصه بندی می‌کنند عبارتند از ارتفاع ناهمواری  $\sigma$ ، طول همبستگی  $\lambda$  و نمای ناهمواری  $H$ . بنابراین با به کار گرفتن این مدل در این مقاله، توانسته‌ایم علاوه بر مطالعه‌ی تأثیر تک تک این مشخصه‌ها، تأثیر همزمان بیش از یک مشخصه‌ی ناهمواری را بر رسانش الکتریکی در یک ساختار دوسدی نامتجانس بررسی نماییم. با تغییر مقادیر مختلف مشخصه‌های مذکور، می‌توان درصد و میزان ناهمواری فصل مشترک را با توجه به انرژی و طول موج الکترون‌های فرودی تغییر داد و نتایجی به‌دست آورد که می‌تواند در انتخاب نوع و روش ساخت لایه‌ها برای تولید ادوات الکترونیکی با کارکرد مطلوب، مفید باشند.

<sup>1</sup> Peak to valley

<sup>2</sup>Negative differential resistance (NDR)

<sup>3</sup>K-correlation model

ساختار مقاله به شرح زیر است. در بخش ۲، نحوه‌ی تولید فصول مشترک ناهموار و نیز فرمول‌بندی و محاسبات ارائه می‌شوند. نتایج محاسبات عددی در بخش ۳ بیان شده و بخش ۴ نیز به نتیجه‌گیری و جمع‌بندی نتایج اختصاص می‌یابد.

### ۱- فرمول بندی و محاسبات عددی

در این مقاله، رسانش الکتریکی در ساختارهای دوسدی نامتجانس  $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  در حالی بررسی شده است که فصول مشترک این ساختارها به دلیل ناهموار بودن، موجب پراکندگی الکترون‌های فرودی و در نتیجه رفتار قابل توجه نسبت قله به دره می‌گردند. محاسبات در چارچوب روش ماتریس انتقال و تقریب الکترون نسبتاً آزاد انجام شده است. همچنین تنها منشا پراکندگی در این جا، لحاظ نمودن ناهمواری در فصول مشترک است. در این بخش، نخست به نحوه‌ی تولید فصول/سطوح مشترک ناهموار با استفاده از مدل همبستگی  $k$  پرداخته و سپس نحوه‌ی وارد نمودن ناهمواری در فرمول بندی محاسبات توضیح داده خواهد شد. معادله شرودینگر و توابع موج برای هر ناحیه برای مسئله مورد بررسی به صورت زیر خواهند بود:

$$H_j(z) = \frac{-\hbar^2}{2m_j^*} \frac{d^2}{dz^2} + V_j(z) \quad (1)$$

$$\psi_j = \sum_q (a_j^y(q) e^{(ik_j z)} + b_j^y(q) e^{-(ik_j z)}) e^{i(q \cdot (x, y))}, \quad (2)$$

که در آن  $j=1-5$  مشخص کننده شماره لایه‌های ساختار دوسدی،  $m_j^*$  جرم مؤثر ناحیه  $j$ ام و  $V_j$  پتانسیل در هر لایه را نشان می‌دهند. در ساختار حاضر، جهت فرود از سمت چپ به راست بوده و فصول مشترک اول و سوم آن ناهموار فرض شده‌اند، بنابراین باید ناهمواری در پتانسیل لحاظ شود. پیش از معرفی شکل پتانسیل در هر ناحیه، به توضیح نحوه‌ی تولید فصول مشترک ناهموار می‌پردازیم.

#### ۱-۱- نحوه تولید فصول مشترک ناهموار

کلیه فصول مشترک ناهموار با سه مشخصه طول همبستگی ( $\xi$ )، ارتفاع ناهمواری ( $\sigma$ ) و نمای زبری ( $H$ ) مشخصه-بندی می‌شوند. طول همبستگی، میانگین فاصله‌ی بین دو قله یا دره‌ی متوالی در سطح است. ارتفاع ناهمواری که ریشه‌ی میانگین مربع نیز نامیده می‌شود، انحراف از سطح را نسبت به صفحه‌ی میانگین نشان می‌دهد. نمای زبری ( $0 \leq H \leq 1$ ) نیز درجه‌ی بی‌نظمی سطح را نشان می‌دهد [۱۹-۱۷]. در حالت کلی، سطوح ناهموار دارای تابع همبستگی هستند که با طول همبستگی مشخصه‌بندی می‌شود. در مقاله حاضر، با توجه به مرجع [۱۹]، از تابع همبستگی  $Cor(R) = \sigma^2 \exp(-(R/\xi)^{2H})$  استفاده شده است که در این رابطه،  $R$  دامنه‌ی بردار موقعیت در صفحه است. در مقیاس‌های طولی کوتاه،  $\xi \ll R$  و مقادیر کوچک  $H$ ، تابع همبستگی رفتار نمایی به صورت

آن متناظر با نوسانات نرم‌تر ارتفاعات سطح است.  $Cor(R) = \sigma^2 (1 - (R/\xi)^{2H})$  دارد. مقادیر کوچک نمای زبری، متناظر با بی‌نظمی بیش‌تر سطح و مقادیر بزرگ آن متناظر با نوسانات نرم‌تر ارتفاعات سطح است.

### ۲-۱- محاسبات مدل

اکنون پس از توضیح ناهمواری و روش تولید آن می‌توان پتانسیل هر ناحیه را نوشت

$$V_j(\mathbf{r}_{\parallel}, z) = \begin{cases} 0, & z < 0, \\ E_{FL} + V(x, y, z) - \frac{eV_a}{4}, & 0 < z < a, \\ -eV_a, & a < z < a + b, \\ E_{FL} + V(x, y, z) - \frac{3eV_a}{4}, & a + b < z < a + b + c, \\ -eV_a, & a + b + c > z, \end{cases} \quad (3)$$

$E_{FL}$  و  $E_{FR}$  انرژی‌های الکترودهای چپ و راست هستند.  $V_a$  پتانسیل الکتریکی اعمالی به ساختار است.  $a$ ،  $b$  و  $c$  به ترتیب ضخامت‌های مربوط به سدها و چاه کوانتومی می‌باشند. پتانسیلی که ناهمواری موجود در دو فصل مشترک زبر را نشان می‌دهد عبارت است از

$$V(x, y, z) = E_c [\theta(z - f(x, y))] \quad (4)$$

در رابطه‌ی بالا،  $E_c$  لبه‌ی نوار هدایت بین دو ماده و  $\theta$  تابع پلکانی است.  $f(x, y)$  ارتفاع سطح مشترک است که به سه پارامتر مشخصه‌بندی کننده‌ی ناهمواری بستگی دارد. در این‌جا، برای تعیین ارتفاعات فصول مشترک از فرمول‌بندی کلی مرجع [۱۸] و تابع همبستگی که در بالا آورده شد، استفاده شده است. بدیهی است که زمانی که فصول مشترک ایده‌ال (تخت و بدون ناهمواری) فرض شوند،  $f(x, y)$  برابر صفر در نظر گرفته شده و تراپرد در آن حالت، ایده‌ال نامیده می‌شود.

اکنون می‌توان با استفاده از توابع موج و مشتق اول آن‌ها در هر ناحیه با توجه به جرم‌های مختلفی که دارند، از فرمول‌بندی ماتریس انتقال که ضرایب ناحیه‌ی اول را به ناحیه‌ی پایانی مرتبط می‌کند، استفاده نمود:

$$\begin{bmatrix} a_5^+ \\ a_5^0 \\ a_5^- \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = M_{total} \begin{bmatrix} 0 \\ a_1^0 \\ 0 \\ b_1^+ \\ b_1^0 \\ b_1^- \end{bmatrix} \quad (5)$$

$M_{total}$  بر اساس روش ماتریس انتقال، حاصل ضرب ماتریس‌هایی است که ضرایب مربوط به ناحیه‌ی اول را به ضرایب مربوط به آخرین ناحیه مرتبط می‌سازند [۱۵]. با توجه به معادله‌ی (5)، می‌توان دریافت که  $b_5^\gamma = 0$ ، زیرا در ناحیه‌ی آخر بازتابی وجود ندارد، همچنین الکترون‌های فرودی تنها مولفه‌ی مستقیم داشته و مولفه‌هایی که جهت‌هایی غیر از مستقیم را نشان می‌دهند ( $a_1^\pm = 0$ ) صفر هستند. با استفاده از روش ماتریس انتقال، تراپرد از ساختار دوسدی به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود [۱۶-۲۰]:

$$T^\gamma(E_z, V_a) = \frac{k_5^\gamma m_1^*}{k_1^\gamma m_5^*} \left| \frac{a_5^\gamma}{a_1^\gamma} \right|^2 \quad (6)$$

$\gamma=0$  و  $\pm$  به مؤلفه‌های مستقیم و غیرمستقیم (پراکنده شده) احتمال عبور اشاره دارد. کمیت‌های  $k_i$ ،  $m_i$  و  $V_a$  به ترتیب، جرم موثر الکترون‌ها در لایه‌های اول و دوم (لازم به ذکر است که ساختار تونل‌زنی مدنظر در این مقاله یک ساختار دوسدی متقارن است)، عدد موج الکترون در امتداد محور Z و ولتاژ اعمالی به سیستم هستند. پس از محاسبه‌ی تراپرد، می‌توان از آن برای محاسبه‌ی جریان الکتریکی بهره برد. در ساختار دوسدی، چگالی جریان در حضور ولتاژ اعمالی  $V_a$  از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

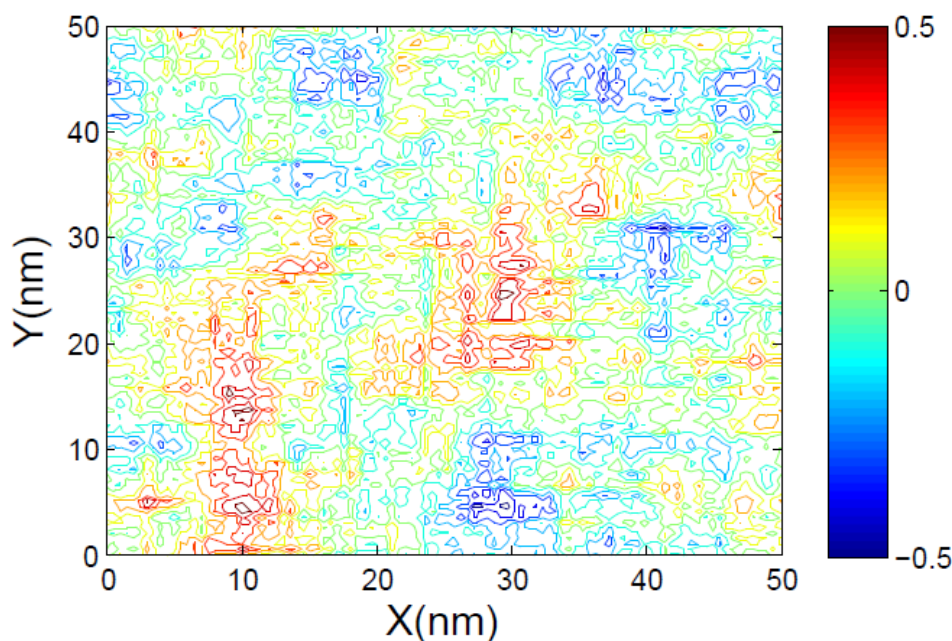
$$j(V_a) = \frac{em^*k_{BT}}{4\pi^2\hbar^3} \int_0^\infty T(E_z, V_a) \ln \left[ \frac{1 + \exp[(E_F - E_z)/k_{BT}]}{1 + \exp[(E_F - E_z - eV_a)/k_{BT}]} \right] dE_z, \quad (7)$$

## ۲- نتایج محاسبات

از آن جایی که در کار قبلی [۲۱]، نتایج مربوط به محاسبه‌ی احتمال عبور در حضور ناهمواری گزارش شده است و با توجه به جامع تعریف شدن مدل ناهمواری، که امکان بررسی تک تک مولفه‌های ناهمواری را میسر می‌ساخت، در پایان آن، هدف بعدی، بررسی بیشتر تأثیر ناهمواری با استفاده از محاسبه‌ی جریان به دست آمده از احتمال عبور قرار داده شد. لذا، در مقاله‌ی حاضر، به محاسبات چگالی جریان مربوط به هدف ذکر شده در بخش پایانی مرجع [۲۱] پرداخته شده است. محاسبات برای مقادیر متفاوت مشخصه‌های ناهمواری، ارتفاع ناهمواری، طول همبستگی سطح و نمای زبری، و تأثیر همزمان این مشخصه‌ها بر مشخصه‌ی جریان-ولتاژ انجام شده است. کلیه محاسبات در دمای صفر انجام شده است. مقادیر استفاده شده در محاسبات به شرح زیر است. ضخامت سدها و چاه کوانتومی برابر با پنج نانومتر در نظر گرفته شده است. جرم‌های مؤثر در الکترودها و چاه کوانتومی و نیز در سدها به ترتیب برابر با  $m_1^* = 0.067 m_0$  و  $m_2^* = (0.067x + 0.083x) m_0$  است که  $m_0$  جرم الکترون آزاد و  $x$  غلظت Al را نشان می‌دهند. انرژی فرمی الکترودها و ولتاژ اعمالی به سیستم به ترتیب برابر با  $54 \text{ meV}$  [15] و  $V_a = 50 \text{ mV}$  است. باید توجه داشت که این

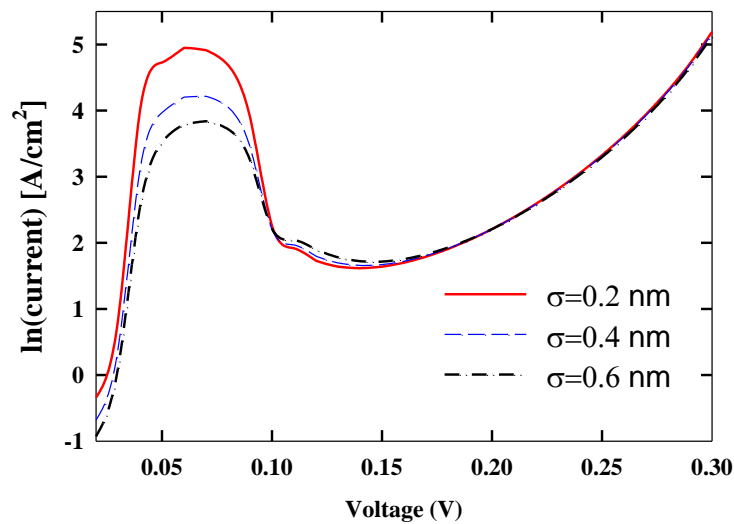
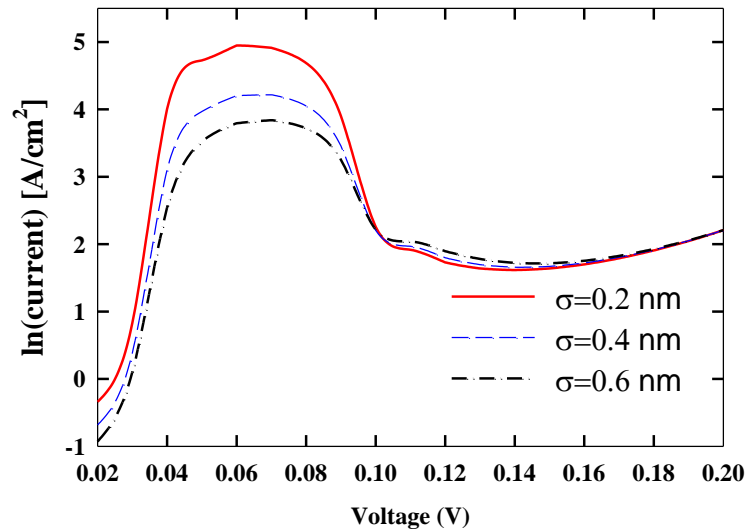
ولتاژ کم‌تر از  $1/3$  ارتفاع سد است و بنابراین ما مجاز به در نظر گرفتن تقریب ترابرد ولتاژ-پایین هستیم [۲۲]. ابعاد فصول مشترک پنجاه نانومتر در پنجاه نانومتر در نظر گرفته شده است.

ساختار مورد بحث در این مقاله، ساختاری نیمه رسانا و نامتجانس دو سدی است که دو تا از فصول مشترک ساختار ناهموار فرض شده است. در شکل (۱)، تصویری از فصل مشترک دو بعدی ناهموار برای ارتفاع ناهمواری  $0.2$  نانومتر، طول همبستگی  $2.5$  نانومتر و ارتفاع ناهمواری  $0.3$  نشان داده شده است، ستون رنگی کنار آن نیز، ارتفاع پستی و بلندی‌های سطح ناهموار را با استفاده از تغییر رنگ نشان می‌دهد.



شکل (۱): تصویری از فصل مشترک ناهموار دوبعدی ساخته شده با استفاده از تابعمدل همبستگی  $k$ .

در شکل (۲)، تغییرات جریان بر حسب ولتاژ برای حالتی رسم شده است که سطوح مشترک ناهموار هستند. وجود ناهمواری موجب پراکندگی الکترون‌های فرودی می‌شود. قله‌ای که در مشخصه‌ی جریان-ولتاژ مشاهده می‌شود، مربوط به تونل‌زنی تشدیدی از میان چاه کوانتومی است. به این ترتیب که، زمانی که انرژی الکترون‌های فرودی با انرژی حالات مقید در چاه کوانتومی تطابق داشته باشد، احتمال تونل‌زنی به مقدار بیشینه‌ی خود رسیده و نتیجه‌ی آن به صورت قله در ترابرد و در نتیجه در جریان مشاهده می‌شود.

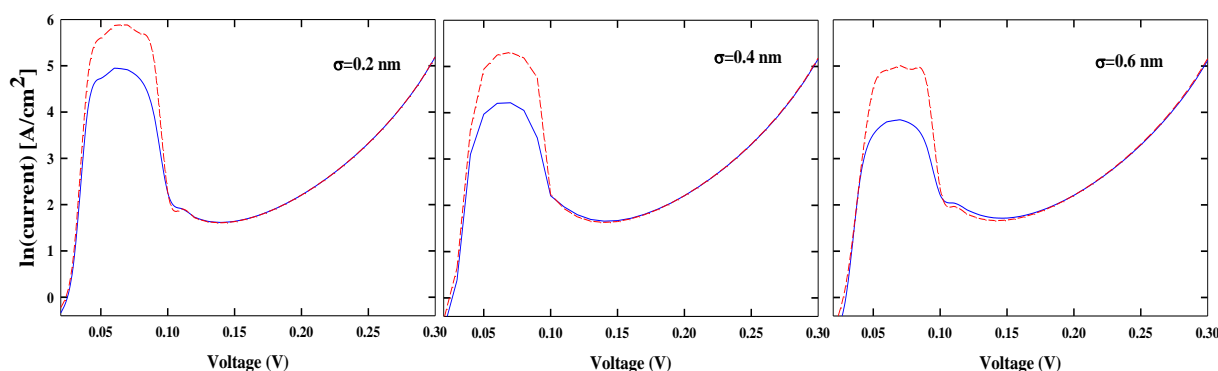


شکل (۲): تغییرات جریان بر حسب ولتاژ اعمالی برای مقادیر ثابت طول همبستگی و نمای زبری و سه مقدار متفاوت ارتفاع ناهمواری. در شکل ۲ بالا و پایین، مقدار طول همبستگی به ترتیب ۰٫۳ و ۲٫۵ نانومتر است.

جریان تونل‌زنی یکی از خواص ترابردی در ساختارهای تونل‌زنی است که از شرایط ساختار به شدت تأثیر می‌پذیرد. در شرایطی که در این مقاله در نظر گرفته شده است، یعنی دو فصل مشترک از ساختار ناهموار در نظر گرفته شده است و تنها منشأ پراکندگی الکترون، ناهمواری باشد، جریان تونل‌زنی تغییر می‌کند. در شکل (۲)، برای مقادیر ثابت نمای زبری و طول همبستگی به ترتیب ۰٫۳ و ۲٫۵ نانومتر در نظر گرفته شده‌اند، تغییرات جریان بر حسب ولتاژ رسم شده است. این تغییرات برای سه مقدار متفاوت ارتفاع ناهمواری بررسی شده است. در ساختارهای تونل‌زنی با فصول مشترک ناهموار، با افزایش ارتفاع ناهمواری متناظر با افزایش پراکندگی الکترون است. افزایش پراکندگی الکترون منجر به کاهش احتمال عبور الکترون‌ها از میان ساختار و در نتیجه کاهش جریان تونل‌زنی می‌شود. از شکل (۲) مشخص است که با افزایش

ارتفاع ناهمواری، نسبت قله به دره‌ی جریان کاهش یافته است که این امر کاهش یافتن تراپرد از ساختار نامتجانس ناهموار را به دلیل وجود ناهمواری نشان می‌دهد.

در شکل (۳)، تاثیر هم‌زمان تغییرات ارتفاع ناهمواری و نمای زبری نشان داده شده است. منحنی‌های توپر و نقطه چین به ترتیب مربوط به نمای زبری ۰٫۳ و ۰٫۷ هستند و از سمت چپ به راست، ارتفاع‌های زبری در نظر گرفته شده به ترتیب ۰٫۲، ۰٫۴ و ۰٫۶ نانومتر هستند. مزیت این نمودارها این است که امکان بررسی تاثیر افزایش ارتفاع ناهمواری و نمای زبری با هم امکان پذیر است. افزایش ارتفاع ناهمواری متناظر با افزایش پراکندگی الکترون‌های فرودی و در نتیجه کاهش احتمال عبور است. در نتیجه‌ی کاهش عبور الکترون‌ها، جریان عبوری از ساختار تونل‌زنی نیز کاهش می‌یابد. این امر، در نمودارهای -از چپ به راست- شکل (۳) قابل مشاهده است. از طرف دیگر، مقدار نمای زبری، درجه‌ی بی‌نظمی سطح را نشان می‌دهد. مقادیر کوچک آن، متناظر با بی‌نظمی و در نتیجه ناهمواری بیشتر و مقادیر بزرگ آن متناظر با نرم شدن افت و خیزهای ارتفاع سطح است و در این حالت، سطح، کم‌تر ناهموار به نظر می‌رسد [۲۳-۱۸].



شکل ۳: نمودار جریان تونل‌زنی بر حسب ولتاژ اعمالی. نمودارهای توپر و خط‌چین به ترتیب مربوط به مقادیر ۰٫۳ و ۰٫۷ برای نمای زبری بوده و ارتفاع ناهمواری از چپ به راست برابر با ۰٫۲، ۰٫۴ و ۰٫۶ نانومتر است.

بنابراین در شکل (۳)، می‌توان مشاهده نمود که افزایش ارتفاع ناهمواری در حضور تغییرات نمای زبری - از مقدار بزرگ به کوچک - سبب افت جریان عبوری شده و کارکرد دیود تونل‌زنی تشدید را کاهش می‌دهد. بنابراین طبق نتایج محاسبات، خصوصیات تراپردی قطعات الکترونیکی به شدت تابع مشخصه‌های سطح به کار رفته در ساخت این قطعات بوده و با انتخاب روش مناسبی برای رشد این سطوح که منجر به کاهش اثرات نامطلوب می‌گردد، می‌توان به کارآیی مطلوب قطعات الکترونیکی دست یافت.



## نتیجه‌گیری

در این مقاله، ترابرد الکتریکی در حالی از میان یک دیود تونل‌زنی تشدیدی محاسبه شد که تعدادی از فصول مشترک آن، با استفاده از یک مدل خاص از تابع همبستگی، ناهموار در نظر گرفته شدند. مزیت استفاده از این مدل خاص ناهمواری، فراهم شدن امکان بررسی مشخصه‌های متفاوت ناهمواری بر جریان عبوری از ساختار بود. محاسبات نشان داد که با افزایش میزان ناهمواری و بنابراین افزایش یافتن اثر پراکندگی، احتمال عبور و در نتیجه‌ی آن جریان تونل‌زنی کاهش می‌یابد. به‌علاوه، با در نظر گرفتن مقادیر بزرگ و کوچک نمای زبری، بی‌نظمی سطح مشترک را کم‌تر و بیش‌تر نموده و تلاش شد که شرایط و خصوصیات سطح به‌کار رفته در ساختار، برای کارکرد بهتر قطعات الکترونیکی تعیین شود.

## منابع

1. B.E. Kane, J. P. Eisenstein, W. Wegscheider, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, Appl. Phys. Lett. 65 (1994) 3266.
2. P. Baumgartner, W. Wegscheider, M. Bichler, G. Schedelbeck, R. Neumann, and G. Abstreiter, Appl. Phys. Lett. 70 (1997) 2135.
3. W. Wegscheider, G. Schedelbeck, G. Abstreiter, M. Rother, and M. Bichle, Phys. Rev. Lett. 79 (1997) 1917.
4. E. C. Valadares, Phys. Rev. B 41 (1990) 1282.
5. Y. Zhang, M. Guan, X. Liu, and Y. Zeng, Nanoscale Res. Lett. 6(1) (2011) 603.
6. R. Magno A. S. Bracker, B. R. Bennett, B. Z. Nosho and L. J. Whitman<sup>1</sup>, J. Appl. Physics 90 (12) (2001) 6177.
7. L. Esaki and R. Tsu, IEM J. Res. Develop. 14 (1970) 3979.
8. F. Capasso, "Physics and Applications of Quantum Wells and Superlattices" E. E. Mendez and K. von Klitzing (New York: Plenum) (1987) p377.
9. T. C. L. G. Sollner, W. D. Goodhue, P. E. Tannenwald, C. D. Parker and D. D. Peck, Appl. Phys. Lett. 43 (1983) 588.
10. B. G. R. Rudberg, Semicond. Sci. Technol. 5 (1991) 600.
11. J. A. Ogilvy, Phys. D: Appl. Phys. 24 (1989) 2098.
12. J. A. Ogilvy and J. R. Foster, J. Phys. D: Appl. Phys. 22 (1989) 1243.

13. S. K. Kirby, D.Z.Y. Ting, and T.C. McGill, *Semicond. Sci. Technol.* 9 (1994) 918.
14. Y. Zhang and S. Sundararajan, *Appl. Phys. Lett.* 88 (2006) 141903.
15. H. C. Liu and D. D. Coon, *J. Appl. Phys.* 64 (1988) 6785.
16. W. T. Dietze and R. B. Darling, *Phys. Rev. B* 53 (1996) 3925.
17. G. Palasantzas and J. Barnas, *Phys. Rev. B* 56 (1997) 7726.
18. G. Palasantzas, J. Barnas, and Th. M. De Hosson, *J. Appl. Phys.* 88 (2000) 927.
19. S. K. Sinha, E. B. Sirota, S. Garoff, and H. B. Stanley, *Phys. Rev. B* 38 (1988) 2297.
20. ZH. Ebrahiminejad, R. S. Dariani, and S. F. Masoudi, proceeding of 4<sup>th</sup> international conference on nanostructures (ICNS4) (2012) 1582.
21. Zh. Ebrahiminejad, S. F. Masoudi, G. R. Jafari, and R. S. Dariani, *Thin Solid Films* 522 (2012) 233.
22. C.W. Mille, Z.-P. Li, I.K. Schuller, R.W. Dave, J.M. Slaughter, and J. Akerman, *Phys. Rev. B* 74 (2006) 212404.
23. J.D. Bruno, J.S. Hurley, *Superlat. Microstru.* 11(1) (1992) 23.