نشریه علوم دانشگاه خوارزمی
جلد ۱۲، شماره ٤
تاریخ چاپ پاییز ۱۳۹۲

محاسبهٔ ضریب عبور و چگالی جریان از چاه کوانتومی مثلثی دوگانهٔ متقارن

*رضا ثابت داریانی؛ دانشگاه الزهرا، دانشکدهٔ علوم
زهرا خدام درباری؛ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده

دراین مقاله مشخصه‌های تشدید تونل‌زنی (ضریب عبور، چگالی جریان و مقاومت دیفرانسیل منفی) از چاه‌های کوانتومی دوگانهٔ مثلثی $Al_x Ga_{1-x} As / Ga As$ بررسی شده است. برای حل معادلهٔ مستقل از زمان شرودینگر در ساختارهای چاه مثلثی از تابع ایری[۱] استفاده شده است. به‌طور اساسی، عبارت‌های دقیق ضرایب بازتاب وعبور قبل و بعد از اعمال میدان الکتریکی خارجی برای دو چاه کوانتومی مثلثی متقارن براساس تقریب جرم مؤثر به‌عنوان تابعی از پارامترهای ساختار شامل پهنای چاه، پهنای سد، عمق چاه و ولتاژ اعمال شده به‌دست آمده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که یک رفتار مقاومت دیفرانسیلی منفی در این گونه چاه‌های کوانتومی دیده می‌شود

مقدمه

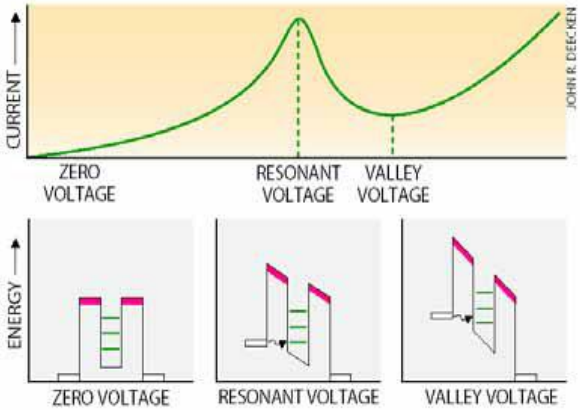
امروزه تکنیک‌های جدید رشد، نظیر برآرایی باریکهٔ مولکولی[۲] و نشست بخار شیمیایی فلز آلی[۳]، این امکان را فراهم می‌سازد که بتوان ساختارهای نیمه رسانای فرانازک با کیفیت زیاد را تهیه کرد. رده‌ای از سیستم‌های رشد داده شده به طریق مصنوعی ساختارهای چاه کوانتومی است. تک چاه کوانتومی شامل لایهٔ فرانازک از نیمه‌رسانایی با گاف کوچک است که بین لایه‌های نیمه‌رسانای گاف بزرگ‌تر محدود شده باشد [۱]، [۲]، [۳]. نمونه‌ای که بررسی می‌کنیم لایهٔ نازک Ga As با انرژی گاف 1/5 ev است که بین لایه‌های آلیاژ سه‌تایی $Al_x Ga_{1-x} As$ قرار می‌گیرد. x کسر مولی آلومینیوم است و در محدودهٔ ۱>x>۰ قرار دارد. AlAs خالص نیمه‌رسانای با گاف غیرمستقیم است؛ ولی برای $Al_x Ga_{1-x} As$ دارای گاف مستقیم است که بسته به غلظت آلومینیوم قدری از ۲ev کمتر است. ویژگی‌های جالب توجه تشدید تونل‌زنی (ضریب عبور، ضریب بازتاب، چگالی جریان و مقاومت دیفرانسیل منفی) در ساختارهایی که شامل سدهای دوگانه هستند بسیار مورد توجه دانشمندان فیزیک کوانتوم و نیز مهندسان برای کاربرد در وسایلی با فرکانس‌های بالا قرار گرفته است. ساختارهایی با سدهای دوگانهٔ مستطیلی و مربعی همیشه به‌عنوان مدل نظری مورد توجه قرار گرفته‌اند؛ زیرا

واژه‌های کلیدی: چاه‌های کوانتومی مثلثی دوگانهٔ متقارن، ضریب عبور، ضریب بازتاب، چگالی جریان، مقاومت دیفرانسیلی منفی
دریافت ۹۰/۱۱/۲ پذیرش ۹۱/۱۲/۸
*نویسنده مسئول dariani@alzahra.ac.ir

۱. Airy Function ۲. Molecular Beam Epitaxy (MBE)
۳. Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

شامل معادلات ساده‌تر و تطابق بهتر با اطلاعات آزمایشگاهی هستند. با وجود این، با پیشرفت تکنولوژی رشد و برآرایی بلوری و ساخت دستگاه‌های جدید الکترونی، تنوع پتانسیل به‌کار رفته در این وسیله‌ها افزایش گسترده‌ای یافته، برای مثال سدها و چاه‌های مثلثی، سدها و چاه‌های ذوزنقه‌ای، سدهایی با شکل نامعین. اگر کسی بخواهد اطلاعاتی راجع به ویژگی‌های تشدید تونل‌زنی در وسایلی با پتانسیل‌های شیب‌دار داشته باشد، باید ابتدا به سراغ سدها و چاه‌های کوانتومی دوگانهٔ مثلثی برود. با وجود این پژوهش‌های اندکی در این زمینه صورت گرفته است [۴]، [۵]، [۶]. هنگام ساخت نیمه‌رساناهای نامتجانس امکان کمی وجود دارد که شکل سدهای پتانسیل ایجاد شده به شکل مربعی یا مستطیلی باشند. از مشاهدهٔ طیف‌های این نیمه‌رساناها مشخص شده است که شکل پتانسیل آن‌ها تقریباً شبیه مثلث است. با توجه به این موضوع اهمیت بررسی پتانسیل‌های مثلثی و ویژگی‌های اپتیکی آن‌ها بیش‌تر مشخص می‌شود. در این مقاله سعی شده است به‌عنوان کاری جدید ویژگی‌های این نوع ساختارها با توجه به منحنی‌های عبور برحسب پارامترهای چاه کوانتومی مثلثی بررسی شود. منحنی‌های به‌دست آمده در بخش‌های بعد با منحنی‌های موجود از سدهای مربعی شیب‌دار شده با اعمال میدان الکتریکی تطابق کامل دارند. در شکل ۱ مراحل تونل زنی در یک چاه پتانسیل مستطیلی با ساختار نامتجانس نمایش داده شده است.



شکل ۱. چاه پتانسیل تکی که در سه حالت بدون اعمال ولتاژ، ولتاژ تشدید و ولتاژ بالاتر از حالت تشدیدی قرار گرفته است [۷]

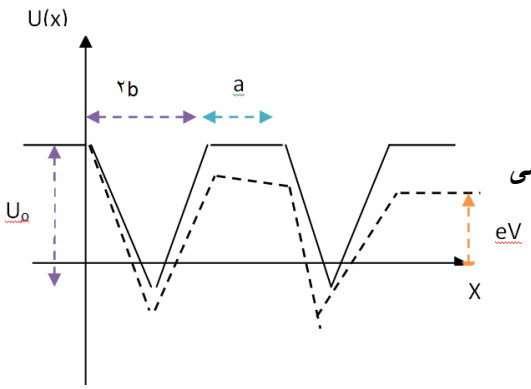
در حالت کلی اگر هیچ ولتاژی به قطعه اعمال نشود، ترازهای شبه‌مقید داخل چاه ممکن است بالاتر از انرژی فرمی در اتصالات قرار گیرند. در این حالت هیچ الکترونی به داخل چاه تونل نمی‌زند و جریان خالص صفر است. با اعمال یك ولتاژ خارجی، شبه تراز مقید داخل چاه پایین می‌آید تا جایی‌که با لبهٔ انرژی فرمی موجود در گسیلنده هم‌راستا می‌شود و تونل‌زنی تشدیدی رخ می‌دهد، در این شرایط الکترون‌ها با احتمال زیاد از داخل قطعه عبور می‌کنند و افزایش شدیدی در جریان مشاهده می‌شود. این حالت تا زمانی‌که تراز شبه‌مقید داخل چاه از لبهٔ نوار رسانش عبور کند ادامه دارد، با ادامهٔ افزایش ولتاژ تراز شبه مقید داخل چاه پایین‌تر از لبهٔ نوار رسانش در اتصالات قرارمی‌گیرد و تونل‌زنی تشدیدی از بین می‌رود. در نتیجه افت شدیدی در جریان مشاهده می‌شود. این ساده‌ترین توصیف مقاومت دیفرانسیلی منفی (NDR) برای درك مفهوم تونل‌زنی تشدیدی است که

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

در آن هیچ برهمکنشی با حامل‌ها در نظر گرفته نشده است. ساختارهای دیودهای تونل‌زنی تشدیدی به‌دلیل وجود مقاومت دیفرانسیلی منفی و همچنین به‌دلیل سرعت زیاد الکترون‌ها از اهمیت زیادی در صنعت نانوالکترونیك برخوردارند و قطعاتی که از این نوع ساختارها در طراحی آن‌ها استفاده می‌شوند به‌دلیل همین دو ویژگی به عنوان قطعاتی با سرعت زیاد[۱] یا قطعات تابعی[۲] در صنعت الکترونیك کاربرد دارند [۷].

محاسبهٔ ضریب عبور و ضریب بازتاب

با در نظر گرفتن معادلهٔ شرودینگر مستقل از زمان یک بعدی برای ساختاری شامل دو چاه کوانتومی مثلثی به ضخامت ۲b و یک سد مستطیلی به ضخامت a مطابق شکل ۲ به‌طوری‌که عمق چاه به‌طور خطی با فاصله از ۰ تا u_o در وسط چاه تغییر می‌کند.



شکل ۲. منحنی چاهی دوگانهٔ مثلثی، خط پر پتانسیل چاه کوانتومی مثلثی دوگانه، خطچین پتانسیل چاه بعد از اعمال میدان الکتریکی خارجی

با توجه به پتانسیل که در شکل دیده می‌شود تابع موج در ناحیهٔ سد به‌صورت نمایی ولی در ناحیهٔ چاه‌ها به‌دلیل وابستگی پتانسیل به فاصلهٔ (مؤلفه x) تابع موج به شکل تابع ایری[۳] خواهد بود [۸].

$$\varphi_1(x) = \exp(ikx) + r\exp(-ikx) \qquad x < o \qquad (۱)$$

$$\varphi_2(x) = a_2 Ai(y_2) + b_2 Bi(y_2), \qquad o < x < b \qquad (۲)$$

$$\varphi_3(x) = a_3 Ai(y_3) + b_3 Bi(y_3), \qquad b < x < 2b \qquad (۳)$$

$$\varphi_4(x) = a_4 \exp(ikx) + b_4 \exp(-ikx) \qquad 2b < x < 2b + a \qquad (۴)$$

$$\varphi_5(x) = a_5 Ai(y_5) + b_5 Bi(y_5), \qquad 2b + a < x < 3b + a \qquad (۵)$$

$$\varphi_6(x) = a_6 Ai(y_6) + b_6 Bi(y_6), \qquad 3b + a < x < 4b + a \qquad (۶)$$

$$\varphi_7(x) = t\exp(ikx) \qquad 4b + a < x \qquad (۷)$$

که در آن

$$y_2 = \beta(\eta + x - b), y_3 = \beta(\eta - x + b), y_5 = \beta(\eta + x - 3b), y_4 = \beta(\eta - x + 3b)$$

و

$$\beta = \left(\frac{2m^* u_o}{b\hbar^2}\right)^{1/3}, \eta = \frac{bE}{u_o}, k = \sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2}(E - u_o)}$$

۱. High speed devices ۲. Functional devices ۳. Airy functon

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

در روابط (۱) و (۳) r,t به‌ترتیب دامنه عبور و بازتاب هستند. سایر پارامترها ضرایب ثابت هستند که از شرط پیوستگی تابع موج و مشتق تابع موج در مرزها به‌دست می‌آیند. با استفاده از روش ماتریس انتقال برای محاسبه ضریب عبور و بازتاب داریم:

$$\begin{pmatrix}1\\ r\end{pmatrix}=\frac{1}{2}\begin{pmatrix}1 & -ik^{-1}\\ 1 & ik^{-1}\end{pmatrix}M\begin{pmatrix}1 & 1\\ ik & -ik\end{pmatrix}\begin{pmatrix}t\exp(ikx)\\ o\end{pmatrix} \qquad (۸)$$

که

$$M=M_1M_2^{-1}M_3M_4^{-1}\begin{pmatrix}\cos(ka) & -\sin(ka)/k\\ k\sin(ka) & \cos(ka)\end{pmatrix}M_1M_2^{-1}M_3M_4^{-1}$$

و دیگر ماتریس‌ها از پیوستگی توابع موج در مرزها به‌دست می‌آیند. در ادامه برای دامنهٔ موج و دامنهٔ بازتاب داریم:

$$t\exp(ikx)=\frac{2}{M_{11}+M_{22}+i(k_xM_{12}-k_x^{-1}M_{21})}$$
$$r=\frac{M_{11}-M_{22}+i(k_xM_{12}+k_x^{-1}M_{21})}{M_{11}+M_{22}+i(k_xM_{12}-k_x^{-1}M_{21})} \qquad (۹)$$

و برای ضریب عبور و بازتاب داریم:

$$T(E)=[t\exp(ikx)]*[t\exp(ikx)]=\frac{4}{(M_{11}+M_{22})^2+(k_xM_{12}-k_x^{-1}M_{21})^2} \qquad (۱۰)$$

$$R(E)=r*r=\frac{(M_{11}-M_{22})^2+(k_xM_{12}+k_x^{-1}M_{21})^2}{(M_{11}+M_{22})^2+(k_xM_{12}-k_x^{-1}M_{21})^2} \qquad (۱۱)$$

محاسبهٔ چگالی جریان

با اعمال ولتاژ به دو سر دیودی شامل دو چاه پتانسیل مثلثی، پتانسیل ساختار مطابق شکل ۲، (خطوط خطچین) تغییر می‌کند.اگر تغییر پتانسیل به‌صورت $\frac{eV}{a+4b}x$ باشد، ماتریس M در رابطهٔ (۹) به شکل زیر تغییر می‌کند.

$$M=M_1\cdot M_2\cdot M_3\cdot M_4\cdot M_5\cdot M_6\cdot M_7\cdot M_8\cdot M_9\cdot M_{10}$$
$$M_1\cdot M_2=\begin{pmatrix}Ai(\beta_2(\eta_2-b)) & Bi(\beta_2(\eta_2-b))\\ \beta_2Ai'(\beta_2(\eta_2-b)) & \beta_2Bi'(\beta_2(\eta_2-b))\end{pmatrix}\begin{pmatrix}Ai(\beta_2\eta_2) & Bi(\beta_2\eta_2)\\ \beta_2Ai'(\beta_2\eta_2) & \beta_2Bi'(\beta_2\eta_2)\end{pmatrix}^{-1} \qquad (۱۲)$$

$$M_3\cdot M_4=\begin{pmatrix}Ai(\beta_3(\eta_3+2b)) & Bi(\beta_3(\eta_3+2b))\\ -\beta_3Ai'(\beta_3(\eta_3+2b)) & -\beta_3Bi'(\beta_3(\eta_3+2b))\end{pmatrix}$$
$$\times\begin{pmatrix}Ai(\beta_3(\eta_3+b)) & Bi(\beta_3(\eta_3+b))\\ -\beta_3Ai'(\beta_3(\eta_3+b)) & -\beta_3Bi'(\beta_3(\eta_3+b))\end{pmatrix}^{-1} \qquad (۱۳)$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

$$M_5 \cdot M_6 = \begin{pmatrix} Ai(\beta_4(\eta_4+2b+a)) & Bi(\beta_4(\eta_4+2b+a)) \\ -\beta_4 Ai'(\beta_4(\eta_4+2b+a)) & -\beta_4 Bi'(\beta_4(\eta_4+2b+a)) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} Ai(\beta_4(\eta_4+2b)) & Bi(\beta_4(\eta_4+2b)) \\ -\beta_4 Ai'(\beta_4(\eta_4+2b)) & -\beta_4 Bi'(\beta_4(\eta_4+2b)) \end{pmatrix}^{-1} \quad (۱۴)$$

$$M_7 \cdot M_8 = \begin{pmatrix} Ai(\beta_5(\eta_5-3b-a)) & Bi(\beta_5(\eta_5-3b-a)) \\ \beta_5 Ai'(\beta_5(\eta_5-3b-a)) & \beta_5 Bi'(\beta_5(\eta_5-3b-a)) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} Ai(\beta_5(\eta_5-2b-a)) & Bi(\beta_5(\eta_5-2b-a)) \\ \beta_5 Ai'(\beta_5(\eta_5-2b-a)) & \beta_5 Bi'(\beta_5(\eta_5-2b-a)) \end{pmatrix}^{-1} \quad (۱۵)$$

$$M_9 \cdot M_{10} = \begin{pmatrix} Ai(\beta_6(\eta_6+4b+a)) & Bi(\beta_6(\eta_6+4b+a)) \\ -\beta_6 Ai'(\beta_6(\eta_6+4b+a)) & -\beta_6 Bi'(\beta_6(\eta_6+4b+a)) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} Ai(\beta_6(\eta_6+3b+a)) & Bi(\beta_6(\eta_6+3b+a)) \\ -\beta_6 Ai'(\beta_6(\eta_6+3b+a)) & -\beta_6 Bi'(\beta_6(\eta_6+3b+a)) \end{pmatrix}^{-1} \quad (۱۶)$$

که

$$\beta_2 = \beta_5 = \left(-\frac{2m^*((a+4b)u_o - eVb)}{b(a+4b)\hbar^2}\right)^{1/3}, \qquad \beta_4 = \left(-\frac{2m^* eV}{b(a+4b)\hbar^2}\right)^{1/3},$$
$$\beta_3 = \beta_6 = \left(-\frac{2m^*((a+4b)u_o + eVb)}{b(a+4b)\hbar^2}\right)^{1/3}, \qquad \eta_2 = \frac{b(a+4b)E}{(a+4b)u_o - eVb},$$
$$\eta_3 = \frac{b(a+4b)(E-2u_o)}{(a+4b)u_o + eVb}, \qquad \eta_4 = \frac{(a+4b)E}{eV}, \qquad \eta_5 = \frac{(a+4b)((a+2b)u_o + bE)}{(a+4b)u_o - eVb},$$
$$\eta_6 = \frac{(a+4b)(bE-(a+4b)u_o)}{(a+4b)u_o + eVb}, \quad (۱۷)$$

با جاگذاری این ماتریس جدید M در روابط (۱۰) و (۱۱) می‌توان ضریب عبور و بازتاب به‌دست آورد. برای محاسبهٔ چگالی جریان J به‌صورت تابعی از ولتاژ اعمال شده به دو سر دیود در دمای (۰ K) داریم [۱].

$$J = \frac{em^*}{2\pi^2\hbar^3}\int_o^{Ef} T(E_f - E)dE \qquad for \quad eV > E_f, \quad (۱۸)$$

$$J = \frac{em^*}{2\pi^2\hbar^3}\left[V\int_o^{Ef-eV} TdE + \int_{Ef-E}^{Ef} T(E_f - E)dE \qquad for \quad eV < E_f, \quad (۱۹)\right.$$

فرض شده است E_f= ۰.۰۰۵eV که در این‌جا

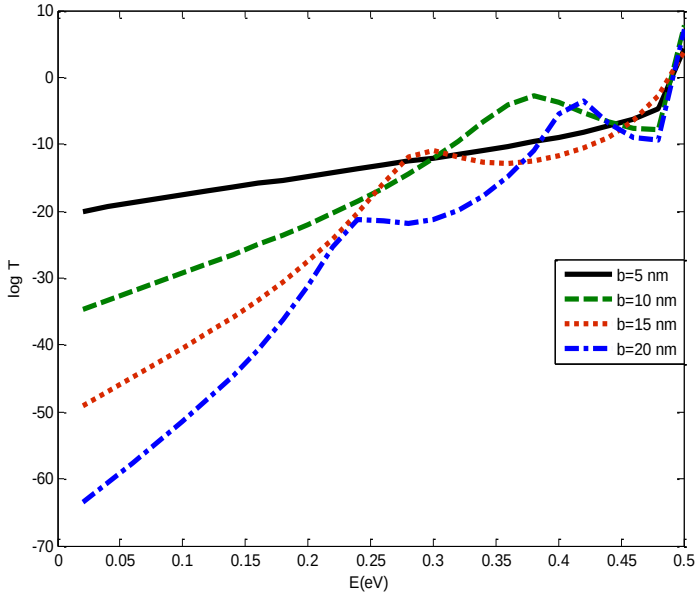
تحلیل نمودارها

نتایج حاصل از شکل ۳:

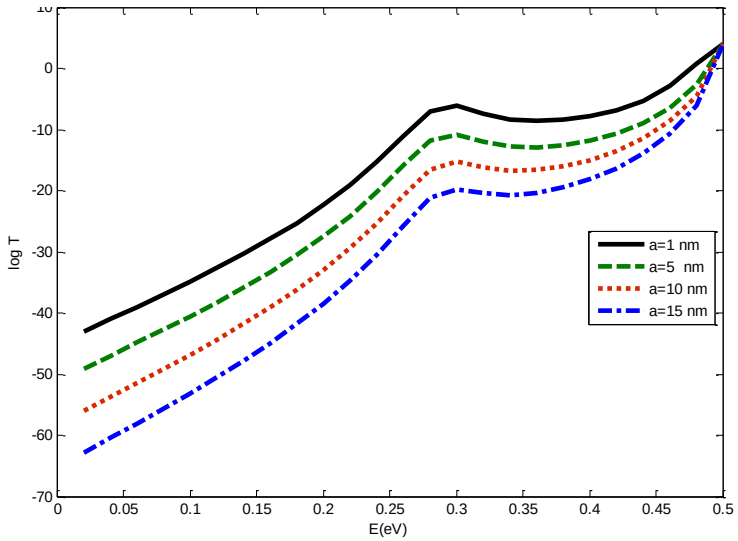
ضریب عبور کاهش یافته زیرا با افزایش پهنای چاه ترازهای مقید داخل چاه پایین می‌آیند و در این چاه به‌دلیل شکل چاه ذره مقیدتر می‌شود و همچنین با افزایش پهنای چاه مثلثی تعداد قله‌های تشدید بیش‌تر و قله‌های تشدید به‌سمت انرژی‌های کم‌تر جابه‌جا می‌شوند. این نتایج با نتایج حاصل از چاه مربعی شیب‌دار شده با اعمال میدان

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

الکتریکی تطابق دارد [۹]. در همهٔ پهناها بزرگـترین قله تشدید مربوط به انرژی برابر با ارتفاع سد است. چون در این انرژی احتمال حضور الکترون درسد کم‌ترین مقدار و در نتیجه ضریب عبور بیش‌تر می‌شود [۱۰].



شکل ۳. منحنی‌هاع ضریب عبور برای چاه دوگانهٔ مثلثی با چاه‌هایی با پهناهای متفاوت



شکل ۴. منحنی‌های ضریب عبور برحسب انرژی برای چاه کوانتومی مثلثی دوگانهٔ با تغییر در پهنای سد

۲. نتایج حاصل از شکل ۴

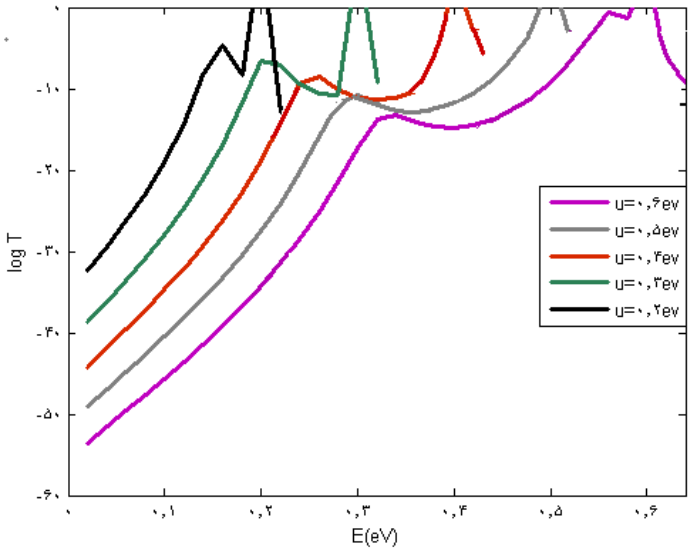
ضریب عبور به طور منظم کاهش یافته زیرا با افزایش پهنای سد مدت زمان حضور الکترون در سد بیش‌تر شده مسافت تونل‌زنی زیاد شده در نتیجه ضریب عبور کاهش می‌یابد.

۳. نتایج حاصل از شکل ۵

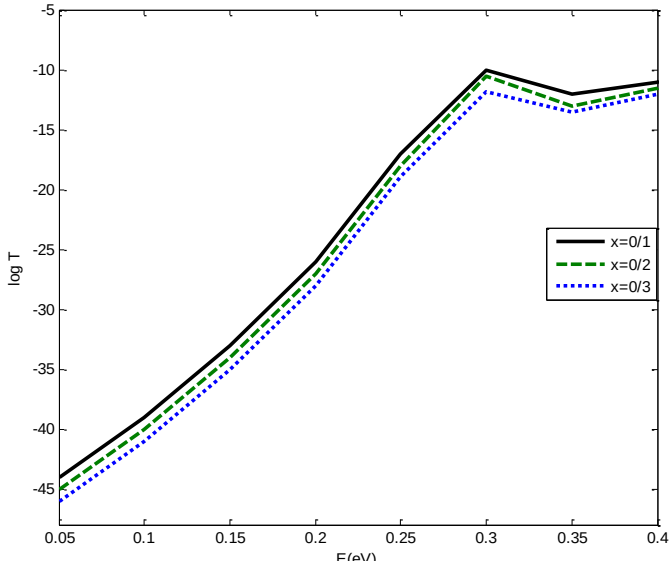
با افزایش عمق چاه روند منظمی را در کاهش ضریب عبور می‌توان مشاهده کرد. با افزایش عمق چاه مقید بودن بودن ذره در چاه زیادتر شده و احتمال خارج شدن ذره از چاه کم می‌شود. همچنین با افزایش عمق چاه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

مثلثی قله‌های تشدید به‌طور منظم به طرف انرژی‌های بیش‌تر جابه‌جا می‌شوند. یعنی با افزایش عمق چاه برای داشتن ضریب عبوربیش‌تر باید ذره‌ای با انرژی بیش‌تری داشته باشیم. چنان‌که در شکل دیده می‌شود اولین قلهٔ تشدید تونل‌زنی در انرژی کم‌تر از عمق چاه دیده می‌شود و این دلالت بر این دارد که تشدید تونل‌زنی و انتقال الکترون همچنان ادامه دارد تا جایی که انرژی ذره ففرودی برابر عمق چاه شود در این حالت شاهد بیش‌ترین تشدید و بیش‌ترین عبور را داریم. با افزایش انرژی ذره بیش‌تر از پتانسیل چاه ضریب عبور کمی کاهش یافته و به یک مقدار ثابت می‌رسد.



شکل ۵. تغییرات ضریب عبور بر حسب انرژی با توجه به تغییر درعمق چاه مثلثی



شکل ۶. نمودار ضریب عبور بر حسب انرژی برای سه غلظت متفاوتAl در سد بین دو چاه مثلثی

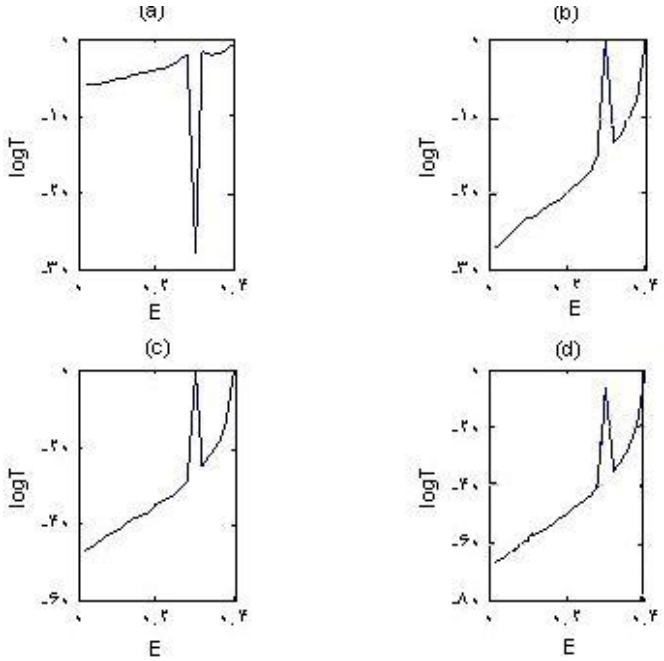
نتایج حاصل از شکل ۶

چنان‌که در شکل ۶ دیده می‌شود با افزایش غلظت آلومینیوم در سد بین دو چاه مثلثی ضریب عبور تغییر محسوسی نمی‌کند فقط قله‌های تشدید کمی جابه‌جا می‌شوند. با افزایش غلظت Al (افزایش کسر مولی Al) ارتفاع

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

سد پتانسیل افزایش یافته و تأثیر جرم مؤثر در پیوند گاه دو ماده بیش‌تر نمایان شده ودر نتیجه سبب کاهش ضریب عبور در سدهای بین دو چاه مثلثی می‌شود. با اعمال میدای الکتریکی که سبب شیب‌دار شدن پتانسیل سد می‌شود، ضریب عبور نسبت به حالت قبل از اعمال میدان افزایش یافته ولی بعد از اعمال میدان دیگر تغییر چندانی در ضریب عبور دیده نمی‌شود. این نتیجه کاملاً با نتیجه حاصل از سد بین دو چاه مثلثی بعد از اعمال میدان تطابق دارد [۱۰]. لازم به ذکر است که ارتفاع سد پتانسیل تابع درصد مول‌های Al (x) است. برای $x<۰/۴۵$، $AlGaAs$ دارای گاف مستقیم گاما و برای $۰/۴۵<x$ دارای گاف غیرمستقیم در T=0K است که در نمودارها این موضوع رعایت گردید.

بعد از اعمال ولتاژ ضریب عبور افزایش می‌یابد. در زیر نمودار چگالی جریان برحسب ولتاژ برای چاه‌های مثلثی با پهناهای متفاوت رسم شده است.

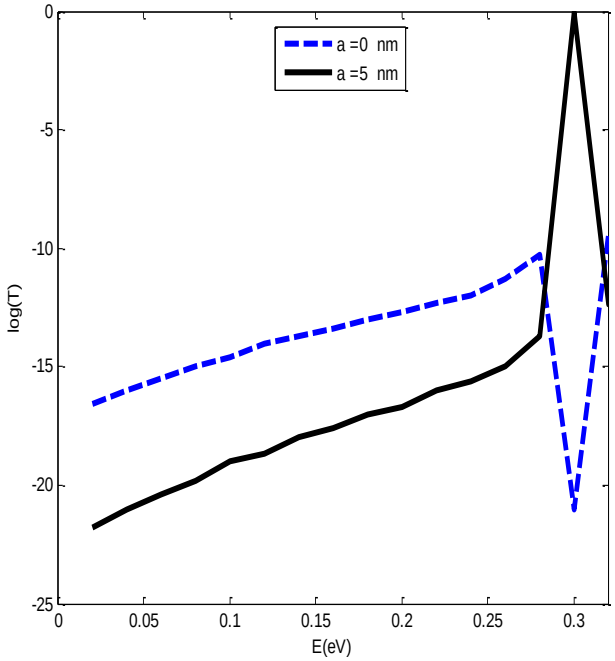


شکل ۷. منحنی ضریب عبور برای ساختارهایی با چاه‌های مثلثی a) تکی، b) دوگانه، c) سه گانه، d) چهارگانه با a=5nm وb=10 nm

۵. نتایج حاصل از شکل ۷

چنان‌که در شکل۷ دیده می‌شود با افزایش تعداد چاه، ضریب عبور به‌میزان چشم‌گیری کاهش یافته ولی تغییری در تعداد پیک‌ها یا چندگانه شدن پیک‌های تشدید مانند چاه‌های مستطیلی دیده نمی‌شود. می‌دانیم که با اعمال میدان الکتریکی به چاه‌های مستطیلی می‌توان شکل چاه را تغییر داد و چاه شیب‌دار ایجاد کرد. با مقایسهٔ منحنی‌های عبور چاه‌های مستطیلی قبل و بعد از اعمال میدان الکتریکی می‌بینیم که بعد از اعمال میدان، قله‌های چندتایی در نمودار ضریب عبور چاه‌های مستطیلی شکسته شده و دیگر حالت چندتایی ندارند [۱۱]. درست همان چیزی که در چاه‌های مثلثی شکل ۷ دیده می‌شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]



شکل ۸. منحنی ضریب عبور برای یکی دو چاه جفت شده و دیگری دو چاه و یک سد در وسط

۶. نتایج حاصل از شکل ۸

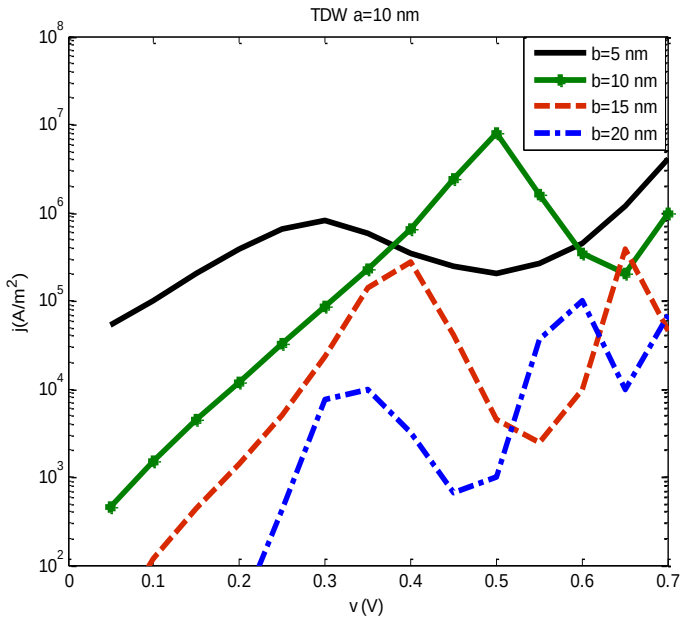
با حذف یک سد از ساختار چاه دوگانهٔ مثلثی، طبق انتظار ضریب عبور افزایش یافت. چون دیگر سدی برای تونل‌زنی وجود ندارد. اما چنان‌که مشاهده می‌شود در انرژی برابر با ارتفاع سد دو اتفاق متفاوت روی می‌دهد. این دو اتفاق را با تابع احتمال حضور ذره در چاه می‌توان توضیح داد. بررسی‌ها نظری نشان می‌دهند که احتمال حضور الکترون در در پایین‌ترین نقطهٔ چاه پتانسیل که کم‌ترین پتانسیل را دارد از همه جا بیش‌تر و در سد پتانسیل از همه جا کم‌تر است [۱۱]. وقتی احتمال حضور الکترون در جایی زیاد است؛ یعنی مقید به ماندن در آن‌جاست، پس احتمال خارج شدن کم شده در نتیجه ضریب عبور در انرژی برابر با عمق چاه الکترون کاملاً در چاه گیر افتاده و شاهد افت شدیدی در دو چاه جفت شده هستیم. اما با قرار دادن یک سد در وسط دو چاه چون احتمال حضور در سد کم‌ترین مقدار را دارد ضریب عبور افزایش ناگهانی خواهد داشت.

بعد از اعمال ولتاژ ضریب عبور افزایش می‌یابد. در زیر نمودار چگالی جریان برحسب ولتاژ برای چاه‌های مثلثی با پهناهای متفاوت رسم شده است.

۷. نتایج حاصل از شکل ۹

بعد از اعمال میدان، با افزایش پهنای چاه مثلثی چگالی جریان خروجی کاهش می‌یابد و پیک‌های چگالی جریان در ولتاژهای پایین‌تر ایجاد می‌شوند. هر چند که با پهن‌تر شدن چاه ترازهای مقید داخل چاه پایین می‌آید، ولی چون با اعمال میدان شیب چاه بیش‌تر می‌شود ، ذره بیش‌تر مقید شده و ضریب عبور کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل بلندترین قله تشدید مربوط به حالتی است که پهنای سد و چاه برابر است. پیک‌های چگالی جریان نشان دهندهٔ مقاومت دیفرانسیلی منفی در این ساختارهاست که با نتایج حاصل از چاه مربعی منطبق است [۲].

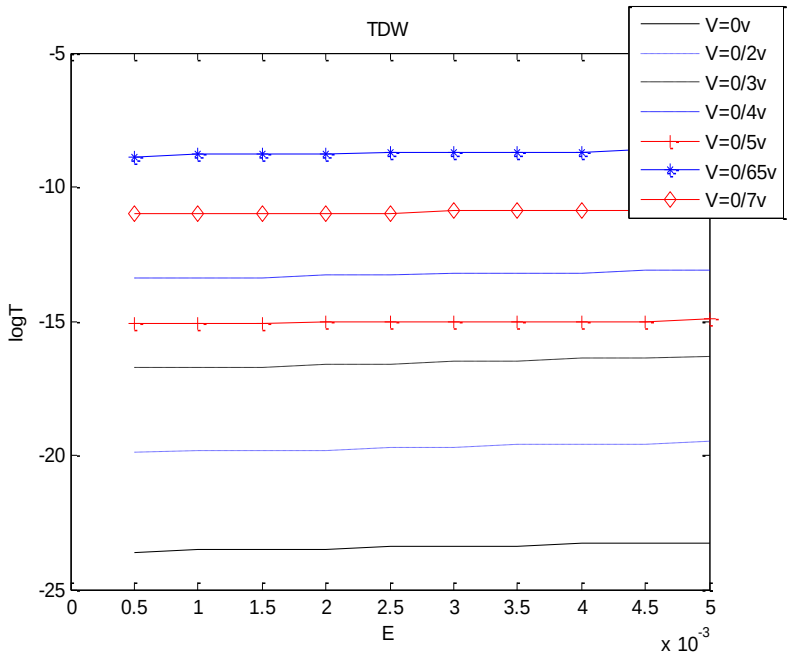
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]



شکل ۹. منحنی‌های چگالی جریان برای چاه دوگانهٔ مثلثی با فرض a=10 nm و U=0/3 eV

۷. نتایج حاصل از شکل ۱۰

این شکل می‌تواند به‌خوبی مقاومت دیفرانسیل منفی را برای انرژی‌های پایین در چند لایه‌ها نشان دهد. منحنی‌های شکل زیر نشان می‌دهند همچنان که ولتاژ اعمال شده افزایش می‌یابد، منحنی به آرامی بالا می‌رود. ولی در v=0/5 V منحنی ناگهان پایین می‌آید و در v=0/65 V دوباره بالا می‌رود و در v=0/7 V باز منحنی پایین می‌آید؛ یعنی با افزایش ولتاژ ، جریان کم‌تری می‌گیریم. این منحنی نیز با منحنی چاه‌های مربعی منطبق است [۱۲].



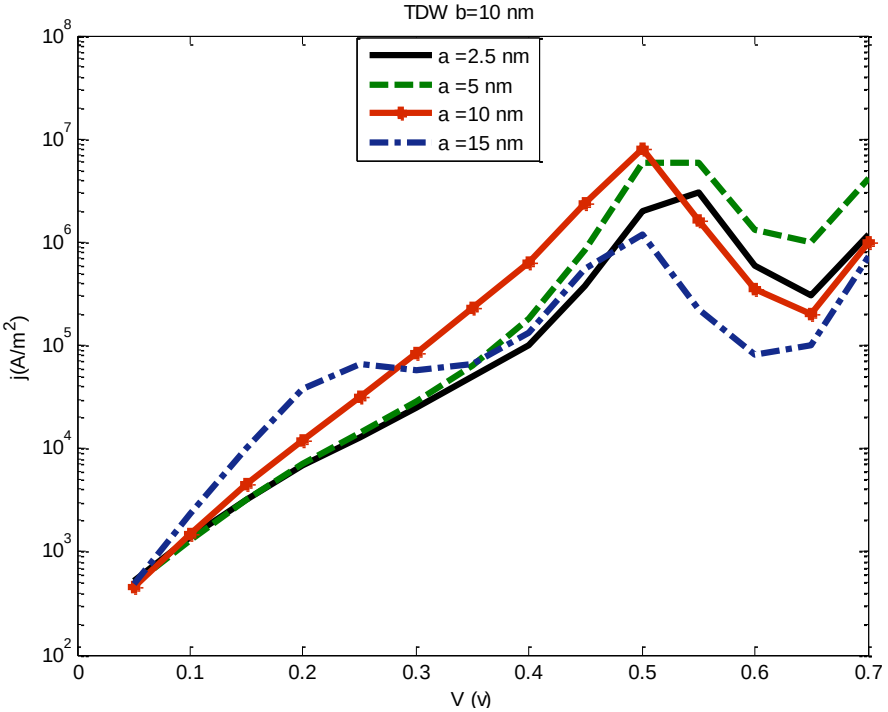
شکل ۱۰. منحنی تغییرات ضریب عبور بر حسب انرژی در ناحیهٔ انرژی پایین با ولتاژهای متفاوت.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

۸. نتایج حاصل از شکل ۱۱

با افزایش پهنای سد چگالی جریان ابتدا به آرامی افزایش و سپس به سرعت کاهش می‌یابد و در جایی که پهنای سد برابر پهنای چاه است بیش‌ترین چگالی جریان را داریم؛ زیرا بعد ازاعمال میدان سد شیب‌دار شده، در ابتدا با افزایش پهنای سد ترازهای انرژی داخل سد پایین آمده و این باعث افزایش تونل‌زنی شده ولی با افزایش بیش‌تر پهنای سد افزایش مسیر تونل‌زنی سبب کاهش ضریب عبور می‌شود.

از مقایسهٔ شکل ۹ و شکل ۱۱ در می‌یابیم که افزایش پهنای چاه مثلثی بیش‌تر از افزایش پهنای سد چگالی جریان را تغییر می‌دهد.



شکل ۱۱- منحنی‌های چگالی جریان برای چاه دوگانهٔ مثلثی با فرض b=10 nm و U=0/3 eV

نتیجه‌گیری

در نیم‌رساناهایی که ساختاری مشابه با چاه کوانتومی دوگانه مثلثی دارند، برای داشتن ضریب عبور بیشینه و آشکارسازی بهتر لازم است ضخامت چاه و سد وعمق چاه کم‌ترین مقدار ممکن و در صورت امکان ضخامت سد برابر یا دو برابر ضخامت چاه باشد. تغییر غلظت Al در این‌گونه ساختارهای شیب‌دار تأثیر چندانی در ضریب عبور ندارد. با اعمال ولتاژ به دو سر نیم‌رسانا می‌توان عبور را به میزان چشم‌گیری افزایش داد و نیز اگر می‌خواهیم شاهد بیش‌ترین اختلاف بین قله و درهٔ چگالی جریان که نشانه مقاومت دیفرانسیلی منفی است باشیم باید سد و چاه مثلثی پهناهای مساوی داشته باشند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

قدردانی

این کار توسط دانشگاه الزهرا حمایت مالی شده است.

منابع

1. S. Wang, "Fundamental of Semiconductor Theory and Device Physics", Prentice Hall Inc, (1989).
2. H. Wang, H. Xu, and Y. Zhang; "A Theoretical Study of Resonant Tunneling Characteristics in Triangular Double-Barrier Diodes", Physics Letters A 355 (2006) 481-488.
3. B. Chen, K. X. Guo, R. Z. Wang, and B. Li, Eur. Phys. J. B 60 (2008) 227-233.
4. S. Vatannia and G. Gildenblat, "IEEE" Journal of Quantum Electronics 32(6) (1996) 1093-1104.
5. A. Aldea, S. Vlaev, G. Monsivais, F. Garcia-Moliner, and V. R. Velasco, J. Phys.: Condens, Matter 8 (1996) 7733-7743.
6. E. Ozturk, Eur. Phys. J. B 75 (2010) 197-203.
۷. فائزه بستام *تعیین منحنی مشخصه I-V چاه‌های کوانتومی چندگانه*، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکدهٔ علوم (۱۳۸۶).
8. P. Harrison, "Quantum Wells, Wires and Dots", 3 edition, Wiley (2010).
9. S. Mukherjee, R. Karmakar, and A. Deyasi, "Theoretical Computation of Transmission Coefficient of Double Quantum Well Triple Barrier Structure in Presence of Electric Field", International Journal of Soft Computing and Engineering, Volume 1, Issue-NCRAMT2011, 41, July (2011).
10. W. Li, "Generalized Free Wave Transfer Matrix Method for Solving the Schrödinger Equation with an Arbitrary Potential Profile", IEEE Journal of Quantum Electronics 46 (6) 970 (2010).
11. A. Korotkov and K. Likharev, "Resonant Fowler-Nordheim Tunneling through Layered Tunnel Barriers and its Possible Applications", Techno. Dig. IDEM'99, 223-226.
۱۲. لیلا مقدسی، عبداله مرتضی علی و رضا ثابت داریانی، *محاسبهٔ ضریب عبور تشدید تونل‌زنی از چندلایه‌های GaAlAs /GaAs* "، مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران جلد ۴، شمارهٔ ۱ (زمستان ۱۳۸۲) ۹۱.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]