مقاله‌نامه بیست و سومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۰-۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)

بررسی تونل‌زنی رزونانس در ترانزیستور اثر میدانی دو گیتی شاتکی ژرمانیومی

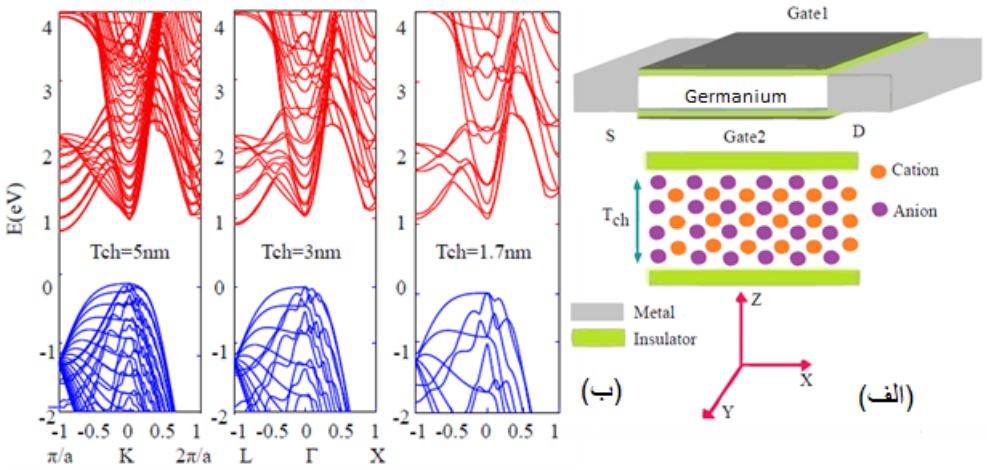
زهرا آهنگری [۱]

[۱] دانشگاه آزاد اسلامی، واحد یادگار امام خمینی (ره) شهر ری، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله تونل‌زنی رزونانس در ترانزیستور اثر میدانی دو گیتی شاتکی با کانال ژرمانیومی به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته است. ترانزیستور شاتکی موجب کاهش مقاومت‌های پارازیتی سورس/درین گردیده و گزینه مناسبی برای کاربرد در ابعاد نانو می‌باشد. تونل زنی از سد شاتکی ساز و کار اصلی جریان در این افزاره است. کاهش ضخامت کانال موجب افزایش سطح انرژی زیرنوارها و در نتیجه افزایش ارتفاع سد شاتکی موثر می‌گردد. با کاهش ولتاژ درین و به دلیل وجود سد شاتکی در فصل مشترک سورس/درین با کانال، یک چاه کوانتومی در راستای انتقال جریان در کانال ایجاد می‌گردد. با تشکیل ترازهای گسسته در طول کانال و در دماهای پایین، تونل زنی رزونانس در این افزاره رخ داده و ناحیه مقاومت منفی در مشخصه انتقالی افزاره مشاهده می‌شود.

به دلیل وجود محدودیت‌های فیزیکی در روند کاهش ابعاد ترانزیستورها، فناوری به استفاده از ساختارهای چند گیتی روی آورده است. برای بهبود عملکرد این افزاره لازم است ضخامت کانال و نواحی سورس/درین کاهش یابد. لیکن این امر موجب کاهش مقاومتهای پارازیتی سورس/درین می‌گردد. جایگزینی سورس/درین آلاییده شده با فلز یا سیلیساید به عنوان یک راه حل اساسی برای رفع این مشکل مطرح شده است [۱]. به دلیل افزایش ارتفاع سد شاتکی موثر در ابعاد نانو و تحت شرایطی، تونل‌زنی رزونانس در این افزاره رخ خواهد داد که منجر به تشکیل ناحیه مقاومت منفی در مشخصه الکتریکی افزاره می‌گردد. لذا در ادامه در خصوص تونل‌زنی رزونانس در ترانزیستور شاتکی با کانال ژرمانیومی با استفاده از روش تنگ بست و تابع گرین غیر تعادلی (NEGF) بحث خواهد شد. شکل ۱(الف)، ترانزیستور دو گیتی شاتکی را نشان می‌دهد. طول کانال ۱۰nm و ضخامت عایق گیت از نوع Si_3N_4 ۱nm انتخاب گردیده است. ارتفاع سد شاتکی در ژرمانیوم برای الکترون‌ها ۱۰۰meV در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: الف) ساختار اتمی ترانزیستور دو گیتی با کانال ژرمانیومی ب)ساختار نواری دو بعدی به ازای ضخامت های مختلف کانال

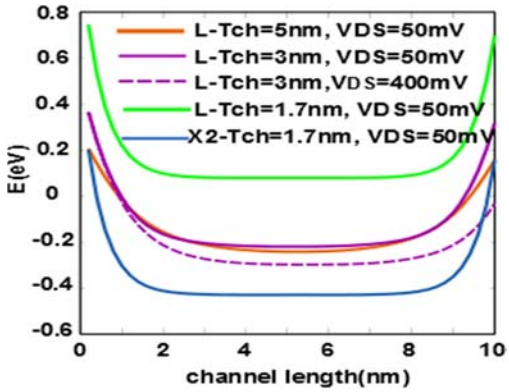
جرم موثر الکترون‌ها در راستای ضخامت کانال و در راستای طول و عرض $H_{2D}(k_x,k_y)=\begin{bmatrix} H_{aa} & H_{ac_{down}} & & & \\ H_{ac_{down}}^{\dagger} & H_{cc} & H_{ac_{up}}^{\dagger} & & \\ & H_{ac_{up}} & H_{aa} & H_{ac_{down}} & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & \ddots & \ddots & \ddots \end{bmatrix}$ (۱)

کانال از ساختار نواری محاسبه شده با روش تنگ سخت محاسبه گردیده است. برای محاسبه ساختار نواری افزاره دو گیتی همیلتونین دوبعدی،H_{2D}، در کانال تشکیل میگردد. برای محاسبه H_{2D} از روش تنگ بست با پایه $sp^3d^5s^*$ استفاده گردیده است. H_{2D} ماتریس سه قطری است و ابعاد آن برابر N_Z ۱۰ ×N_Z۱۰ می‌باشد که در آن N_Z برابر تعداد لایه‌های اتمی می‌باشد. H_{aa} و H_{cc} به ترتیب برابر برهم‌کنش اوربیتال‌های اتم‌های آنیون و کاتیون با یکدیگر می‌باشند. H_{acdown} برابر برهم‌کنش اتم‌های آنیون با اتم‌های نزدیکترین همسایه کاتیون در راستای $Z-$ می‌باشد. H_{acup} نیز برهم‌کنش بین اتم‌های آنیون و نزدیکترین همسایه کاتیون‌ها که در امتداد $Z+$ قرار دارند را نشان می‌دهد. شکل ۱(ب) ساختار نواری ترانزیستور ژرمانیومی را به ازای ضخامتهای مختلف کانال نشان میدهد.

جریان درین تابعی از احتمال عبور و توزیع فرمی الکترون‌ها بوده و از رابطه (۵-۱) محاسبه می‌شود [۳-۲]:

$$I_{DS}=\frac{2q}{\hbar}\int dE_L T(E_L)\left[\mathcal{F}_{-1/2}(E_{FS}-E_L)-\mathcal{F}_{-1/2}\left((E_{FD}-E_L)\right)\right] \quad (۲)$$

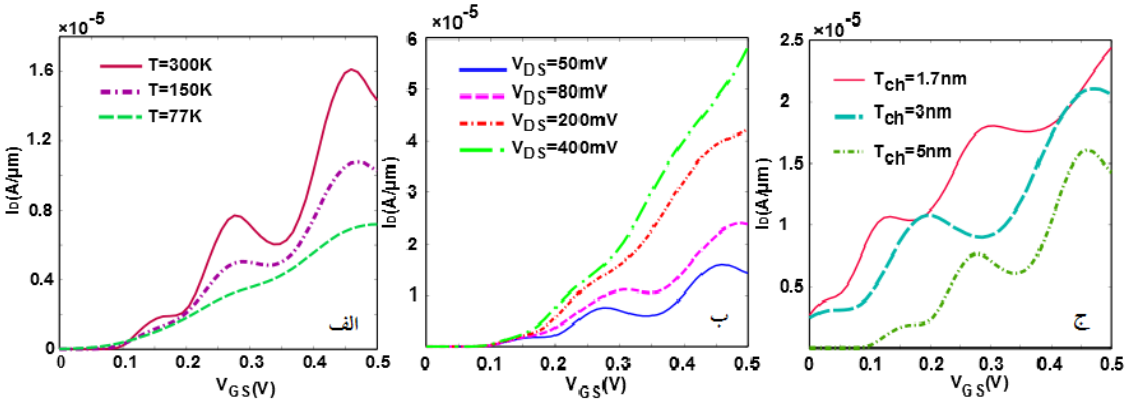
که در آن $\mathcal{F}$ تابع فرمی از درجه ۱/۲-، E_{FS} و E_{FD} به ترتیب ترازهای فرمی سورس و درین می‌باشد. E_L نیز انرژی ترازهای داخل کانال می‌باشد. در ترانزیستور شاتکی کانال ترانزیستور بین دو سد شاتکی سورس و درین قرار دارد. با کاهش ضخامت کانال و افزایش اثرات کوانتومی سطح انرژی زیر نوارها افزایش یافته که این امر منجر به افزایش ارتفاع سد شاتکی موثر می‌گردد. در این حالت به ازای ولتاژهای درین کوچک، کانال بین دو ارتفاع سد شاتکی سورس و درین محصور شده و یک چاه کوانتومی در راستای انتقال جریان تشکیل می‌شود [۵-٤]. از آنجا که مکانیزم اصلی جریان تونل‌زنی از سد شاتکی می‌باشد، هر زمان که انرژی الکترون‌ها در سورس با انرژی ترازهای گسسته موجود در کانال برابر شوند، تونل‌زنی رزونانس رخ خواهد داد. شکل ۲ انرژی اولین زیر نوار را به ازای دو ولتاژ درین ۵۰mV و ٤۰۰mV و به ازای ولتاژ گیت ۰/۵V بر اساس تابعی از ضخامت کانال نشان می‌دهد.



شکل۲ : انرژی اولین زیر نوار در طول کانال به ازای کاهش ضخامت کانال از ۵nm تا ۱,۷nm به ازای ولتاژ گیت برابر ۰/۵V

مقاله‌نامه بیست و سومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۰-۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)

به ازای ضخامت کانال برابر ۵nm کمینه نوار هدایت در نقطه L رخ می‌دهد. در ساختار دو گیتی ژرمانیومی دره‌های X_2 در نقطه Γ تصویر شده‌اند. با کاهش ضخامت کانال به ۳nm سطح انرژی زیر نوارها افزایش می‌یابد. با کاهش ضخامت کانال به ۱/۷ nm، فاصله بین دره‌های L_4 و X_2 به ۱۷meV کاهش می‌یابد. با افزایش ولتاژ درین انحنای چاه پتانسیل در امتداد کانال کاهش می‌یابد. لذا در این حالت چگالی ترازهای مجاز بین تراز فرمی سورس و درین افزایش یافته و احتمال تونل‌زنی رزونانس کاهش می‌یابد. شکل ۳ (الف) اثر دما را بر مشخصه الکتریکی ترانزیستور شاتکی به ازای ضخامت کانال ۳nm در ولتاژ درین ۵۰mV نشان می‌دهد. اگر انرژی حرارتی حامل‌ها از فاصله بین دو تراز گسسته انرژی در داخل چاه کوانتومی کمتر باشد تونل‌زنی رزونانس رخ می‌دهد و نوسان در مشخصه انتقالی افزاره ایجاد میشود. با افزایش دما و افزایش انرژی حرارتی حامل‌ها، نوسان‌های جریان درین نیز ازبین می‌روند. شکل ۳(ب) اثر ولتاژ درین را بر نوسان‌های جریان درین در دمای ۷۷K و در ضخامت کانال ۳nm نشان می‌دهد. با افزایش ولتاژ درین نوسان‌های مشخصه انتقالی کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش ولتاژ درین ، انحنای چاه کوانتومی به تدریج کاهش یافته و ترازهای انرژی بیشتری در جریان شرکت می‌کنند. شکل ۳(ج) اثر ضخامت کانال را بر نوسان جریان درین در ولتاژ درین ۵۰mV و دمای ۷۷K نشان میدهد. با کاهش ضخامت کانال تا ۲nm، به دلیل افزایش سطح انرژی زیرنوارها در دره L، نوسان های جریان درین افزایش میابد. در ضخامتهای کانال زیر ۲nm، به دلیل مشارکت دره X_2 با ارتفاع سد شاتکی کوچکتر، ارتفاع چاه پتانسیل در امتداد کانال کاهش یافته و نوسان جریان درین کاهش میابد.



شکل۳ : منحنی I_D-V_{GS} به ازای الف) تغییرات دما و ضخامت کانال ۳nm و V_{DS}= ۵۰mV ب) تغییرات ولتاژ درین در دمای ۷۷K و ضخامت کانال ۳nm. ج) تغییرات ضخامت کانال به ازای V_{DS}= ۵۰mV در دمای ۷۷K .

نتیجه گیری

در این مقاله شرایط ایجاد تونل زنی رزونانس و ایجاد ناحیه مقاومت منفی در مشخصه الکتریکی ترانزیستور شاتکی مورد بررسی قرار گرفت. با کاهش ضخامت کانال و در ولتاژ درین کوچک یک چاه کوانتومی در امتداد کانال تشکیل میگردد. با کاهش دما و به ازای ولتاژ درین کوچک تونل زنی رزونانس از سورس به کانال صورت میگیرد. با کاهش ضخامت کانال از ۵nm تا ۲nm، به دلیل افزایش ارتفاع سد شاتکی موثر تونل زنی رزونانس افزایش میابد. در ضخامتهای کانال زیر ۲nm، به دلیل مشارکت دره X_2 در جریان، از میزان نوسان جریان درین کاسته میگردد.

مرجع‌ها

1. J. Knoch, M. Zhang, Q. T. Zhao, S. Lenk, J. Appenzeller and S. Mantl, *Appl. Phys. Lett.*, **87**(26), pp. 263505(1-4), 2005.
2. R. Venugoapal, Z. Ren, S. Datta, M.S. Lundstrom and D.Jovanovic, J.Appl.Phys.,92(7), pp.3730, 2002.
3. P.F. Bagwell and T.P Orlando, *Phys. Rev. B.***40**(3), pp.1456-1464, 1989.
4. Z. Ahangari and M. Fathipour, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **46**(44), p.445101, 2013.
5. Z. Ahangari and M. Fathipour, *Chinese Physics B*, **22**(9), pp.098502, 2013