

اثر تله‌های موجود در شکاف باند انرژی بر روی جریان درین در ترانزیستورهای اثر میدان تونلی

سیده محجوبه سجادی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ سعید محمدی^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سمنان - سمنان - ایران - mhj_sajjadi@semnan.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سمنان - سمنان - ایران - sd.mohammadi@semnan.ac.ir

چکیده: در این مقاله، مطالعه‌ای دقیق از مکانیزم تونل‌زنی به کمک تله‌ها در ترانزیستورهای اثر میدان تونلی ارائه شده است. این پدیده باعث تولید جریان نشتی بزرگی قبل از شروع فرایند تونل‌زنی باندبه‌باند می‌شود و نقش کلیدی در تعیین جریان حالت خاموش این ترانزیستورها دارد. با اصلاح فرمول SRH^۱ نشان داده شده است که در دمای اتاق برای ولتاژهای کم‌تر از ولتاژ آستانه جریان تونل‌زنی از طریق تله‌ها همواره غالب بوده و باعث تنزل مشخصه‌ی کلیدزنی ترانزیستور، که توسط شیب زیر آستانه سنجیده می‌شود، می‌گردد. این نتایج برای ساختارهای دو گیتی و GAA^۲ که در آن‌ها تله‌ها بین ناحیه تونل‌زنی سورس-کانال قرار می‌گیرند نیز قابل تعمیم است. فرایند تونل‌زنی از طریق تله‌ها وابستگی قوی به میدان الکتریکی و دما دارد. در ساختار ترانزیستورهای مورد بحث در این مقاله از نیمه‌هادی‌های گروه سه و پنج جدول تناوبی استفاده شده است. همچنین اثر متغیرهای ساختاری مختلف بر میزان جریان تونل‌زنی از طریق تله‌ها در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: ترانزیستور اثر میدان تونلی، تونل‌زنی باندبه‌باند، تونل‌زنی از طریق تله‌ها، رابطه SRH، نیمه‌هادی‌های III-V

Effects of Energy Band Gap Traps on Drain Current in Tunneling Field Effect Transistors

Seyedeh Mahjoubeh Sajjadi¹, MSc Student; Saeed Mohammadi², Assistant Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Semnan, Semnan, Iran, Email: mhj_sajjadi@semnan.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Semnan, Semnan, Iran, Email: sd.mohammadi@semnan.ac.ir

Abstract: In this paper the impact of the trap assisted tunneling mechanism on the subthreshold characteristics of the tunneling field effect transistors is investigated. It is shown that the trap assisted tunneling is the dominant charge transfer mechanism before the band to band tunneling starts. Employing a modified SRH formalism, we show that, at the room temperature and for the subthreshold voltages, the trap assisted tunneling current always dominates and degrades the switching characteristics of the device which is measured by the subthreshold swing. This approach is applicable to the double gate and the gate-all-around structures where the traps are located in the source-channel tunneling junction. The trap assisted tunneling strongly depends on the electric field and the temperature. The considered transistors in this research are based on the compound semiconductors of groups three and five of periodic table. The effects of various structural parameters and material systems on the trap assisted tunneling current are studied, too.

Keywords: Tunnel field-effect transistor, band-to-band tunneling, trap-assisted tunneling, SRH formalism, III-V semiconductors.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۱۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۰۸

نام نویسنده مسئول: سعید محمدی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - سمنان - دانشگاه سمنان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر کوچک‌سازی ترانزیستورهای MOSFET^۳ به منظور افزایش سرعت و بهره‌وری با چالش‌هایی مواجه شده‌است. چالش‌هایی نظیر افزایش چگالی توان، افزایش سوئیچینگ زیر آستانه، جریان نشتی بالا در حالت خاموش و اثرات کانال کوتاه [۲، ۱]. ترانزیستور اثر میدان تونلی یا TFET^۴ ترانزیستوری است که به واسطه مکانیزم متفاوت برقراری جریان در آن می‌تواند جای‌گزین مناسبی برای MOSFET‌ها جهت رفع محدودیت‌های ناشی از کوچک‌سازی آن‌ها باشد [۳]. عمده‌ترین چالشی که TFET با آن رو به روست پایین‌بودن جریان حالت روشن آن است. نیمه‌هادی‌های گروه سه و پنج جدول تناوبی به علت داشتن شکاف باند کوچک و مستقیم، جرم مؤثر کم‌تر و قابلیت تحرک بالاتر می‌توانند جای‌گزین مناسب سیلیسیم و ژرمانیم در ساختار TFET جهت بهبود جریان حالت روشن باشند [۴].

اگر چه بررسی و مدل‌سازی جریان TAT^۵ (جریان تونل‌زنی از طریق تله‌ها) در یک اتصال pn و اثر آن روی مشخصات افزاره در مقالات متعددی گزارش شده‌است [۹-۱۵]. اما در اغلب مقالات مدل‌سازی TFET از اثر تله‌های انرژی صرف‌نظر شده‌است. از این رو مدل‌های ارائه‌شده در این زمینه بسیار محدود می‌باشد. در برخی مقالات برای مدل‌سازی این اثر آن را در قالب پارامتری در سمت راست معادله پواسون وارد کرده‌اند [۱۰]. تعدادی از مقالات نیز مبتنی بر مدل‌های اولیه بوده و اثر تله‌ها را در قالب جریانی جداگانه لحاظ کرده‌اند [۱۱، ۱۲، ۱۳].

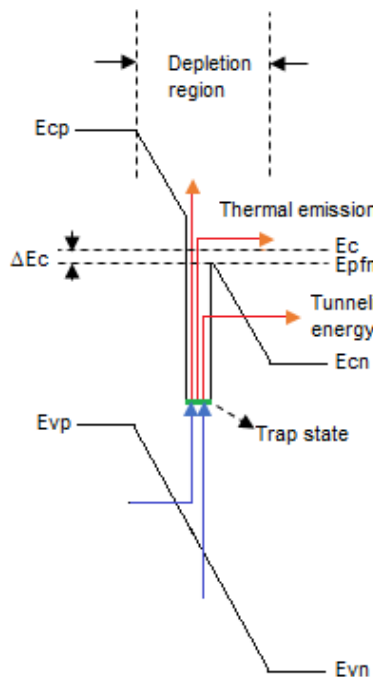
در یک TFET ایده‌آل انتظار می‌رود جریان در زیر ولتاژ آستانه بسیار کم باشد و در نزدیکی ولتاژ آستانه به واسطه شروع فرایند تونل‌زنی باند-به‌باند جریان به سرعت افزایش یابد. چنین سوئیچینگ سریعی در عمل به سختی به دست می‌آید و یکی از دلایل این امر وجود جریان‌های نشتی مانند جریان TAT است که تغییرات سریع جریان تونل‌زنی باند-به‌باند یا BTBT^۶ در نزدیکی ولتاژ آستانه را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. جریان TAT که به‌عنوان یک مکانیزم جریان نشتی در دیویدهای پیوند pn شناخته می‌شود مؤلفه عمده جریان پارازیتی در TFET هاست [۱۳].

در این مقاله ابتدا فرایند تونل‌زنی از طریق تله‌ها در یک اتصال pn تحت بایاس معکوس بررسی خواهد شد. در این حالت الکترون‌ها از باند ظرفیت ناحیه p به تله‌های موجود در شکاف باند رفته و از آن‌جا به باند هدایت ناحیه n می‌روند. بخش مورد اهمیت کار مرحله گذار الکترون از تله به باند هدایت می‌باشد و در واقع این مرحله است که جریان تونل‌زنی از طریق تله‌ها (TAT) را تعیین می‌کند.

آهنگ تولید-بازترکیب حامل‌ها در قالب رابطه SRH بیان می‌شود. وجود تله‌ها در شکاف باند انرژی TFET باعث افزایش آهنگ تولید و بازترکیب حامل‌های آن می‌شود. در مدل ارائه‌شده در این پژوهش اثر پول-فرنکل نیز لحاظ شده‌است که اثر کاهش ارتفاع سد پتانسیل به علت برهم‌کنش کولنی میان تله و شبکه ساختاری ماده است. اثر پول-فرنکل با افزایش تونل‌زنی الکترون‌ها از تله به کانال باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در جریان نشتی می‌شود.

۲- مدل جریان TAT

مانند آنچه در شکل ۱ نشان داده شده‌است، در یک اتصال pn تحت بایاس معکوس یک الکترون در باند ظرفیت ناحیه p می‌تواند با جذب یک فوتون به یک تله درون شکاف باند انرژی برسد. الکترون‌های به‌دام-افتاده در تله از سه طریق می‌توانند خود را به باند هدایت ناحیه n برسانند: ۱- از میان سد پتانسیل تونل بزنند. ۲- از بالای سد پتانسیل عبور کنند. (اثر پول-فرنکل) ۳- با دریافت مقدار معینی از انرژی مستقیماً به باند هدایت بروند. موارد یک و دو زمانی اتفاق می‌افتد که میدان الکتریکی بسیار قوی برقرار باشد.



شکل ۱: دیاگرام باند انرژی در یک اتصال pn در حضور تله [۱۳]

چاه پتانسیلی که توسط یک تله ایجاد می‌شود به شکل یک قیف با سطح مقطع σ_n در نظر گرفته شده‌است. در این‌جا میدان الکتریکی می‌تواند میدان الکتریکی درون ساخت افزاره، میدان الکتریکی خارجی و یا ترکیبی از هر دو مورد باشد. با برقراری میدان الکتریکی ارتفاع سد پتانسیل در خلاف جهت میدان کاهش می‌یابد. میزان این کاهش با ΔE_c مشخص می‌شود. با کاهش ارتفاع سد پتانسیل انرژی لازم جهت انتشار حامل‌ها و عبور آن‌ها از بالای سد نیز به اندازه ΔE_c کاهش می‌یابد. پدیده کاهش ارتفاع سد پتانسیل را که معمولاً در میدان‌های الکتریکی بالا اتفاق می‌افتد اثر پول-فرنکل می‌نامند. این اثر باعث کاهش سطح مقطع چاه پتانسیل نیز می‌شود. حضور میدان الکتریکی باعث افزایش آهنگ تونل‌زنی می‌شود. به تبع آن آهنگ تولید الکترون-حفره نیز افزایش می‌یابد. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد آهنگ تولید-بازترکیب حامل‌ها در قالب رابطه SRH بیان می‌شود و این افزایش در آهنگ تولید حامل‌ها که به واسطه پدیده تونل‌زنی اتفاق می‌افتد در قالب فاکتور Γ به شکل رابطه (۱) در فرمول SRH لحاظ می‌شود [۱۱].

$$\Gamma_{nt} = \frac{E_C - \Delta E_C}{E_{\min}} \frac{\int \frac{1}{kT} \exp\left(\frac{E_C - E_x}{kT}\right) dE_x}{\exp\left(\frac{4(2m)^{1/2}}{3q\hbar F} (E_C - \Delta E_C - E_x)^{3/2}\right)} \quad (8)$$

$$\Gamma_{nPF} = \frac{1}{kT E_{PF\min}} \int_{E_C}^{E_C} \exp\left(\frac{E_C - E_x}{kT}\right) dE_x \quad (9)$$

$$= \left[\exp\left(\frac{E_C - E_{PF\min}}{kT}\right) - 1 \right]$$

حد پایین انتگرال‌ها در عبارات فوق به موقعیت تله‌ها در شکاف باند انرژی بستگی دارد. باتوجه به شکل ۱:

$$E_t \leq E_{cn} \Rightarrow E_{\min} = E_{cn} \quad (10)$$

$$E_t > E_{cn} \Rightarrow E_{\min} = E_t \quad (11)$$

$$E_t \leq (E_C - \Delta E_C) \Rightarrow E_{PF\min} = E_C - \Delta E_C \quad (12)$$

$$E_t > (E_C - \Delta E_C) \Rightarrow E_{PF\min} = E_t \quad (13)$$

آهنگ تولید-بازترکیب حامل‌ها تابعی از مکان تله (x) است و بسته به این‌که تله در شکاف باند انرژی در چه موقعیتی قرار داشته‌باشد میزان انتقال حامل‌ها توسط آن می‌تواند متفاوت باشد. برای محاسبه جریان حاصل از فرایند تونل‌زنی از طریق تله‌ها باید از آهنگ تولید-بازترکیب حامل‌ها نسبت به مکان انتگرال گرفت [۱۳، ۱۴]. محدوده انتگرال از x_1 ابتدای کانال تا x_2 (در این‌جا فاصله یک نانومتر از کانال) تعریف شده-است. بنابراین رابطه جریان TAT به‌صورت زیر خواهد بود:

$$I_{TAT} = qW \int_{x_1}^{x_2} (G - R)(x) dx \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، W عرض افزاره است.

۳- پیاده سازی مدل جریان TAT

افزاره‌ای که در این پژوهش به‌طور خاص مورد بررسی قرار گرفته‌است یک TFET تک‌گیتی با ساختار همگون می‌باشد. بدین‌معنا که نواحی سورس، کانال و درین از ماده‌ای یکسان تشکیل شده‌اند. در این‌جا این ماده $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ است. مشخصات فیزیکی این ماده در جدول ۱ آمده‌است. شکل ۲ (الف) ساختار افزاره مورد بحث و شکل ۲ (ب) نمودار باندهای انرژی آن را هم در حالت روشن (ولتاژ گیت-سورس برابر ۱ ولت) و هم در حالت خاموش (ولتاژ گیت-سورس برابر ۰ ولت) نشان می‌دهد. در هر دو حالت ولتاژ درین-سورس برابر 0.3 V است. در حالت خاموش به‌علت فاصله زیاد تونل‌زنی از سورس تا کانال، تونل‌زنی مستقیم اتفاق نمی‌افتد. در حالت روشن با اعمال ولتاژ مثبت به گیت، باندهای انرژی در ناحیه کانال به سمت پایین رانده شده و مسیری برای تونل‌زنی مستقیم از باند ظرفیت سورس به باند هدایت کانال فراهم می‌شود.

$$G - R = \left[\frac{\int_{E_v}^{E_c} \frac{(n_i^2 - np) g(E_t)}{p + p_1} dE_t}{\sigma_n v_{th} (1 + \Gamma_n)} \right] \quad (1)$$

که در آن G آهنگ تولید، R آهنگ بازترکیب، E_C باند هدایت، E_v باند ظرفیت، n_i غلظت الکترون‌ها در نیمه‌هادی ذاتی، n و p به‌ترتیب غلظت الکترون‌ها و حفره‌ها، $g(E_t)$ تابع توزیع چگالی حالت‌های انرژی تله، σ_n سطح مقطع چاه پتانسیل، v_{th} سرعت حرارتی و E_t تراز انرژی تله است. آهنگ تولید حاصل از فرایند تونل‌زنی و اثر پول-فرنکل بیشتر از حالتی‌ست که تولید تنها به روش گرمایی صورت گیرد [۱۳، ۱۱]. فاکتور Γ_n نشان‌دهنده این افزایش است و به‌صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$\Gamma_n = \frac{1}{kT} \int_{E_{\min}}^{E_C} \exp\left(\frac{E_C - E_x}{kT}\right) T(E_x) dE_x \quad (2)$$

که در آن $T(E_x)$ احتمال انتقال سد پتانسیل، T دما و k ثابت بولتزمن است. در رابطه (۱) متغیرهای p_1 و v_{th} به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$p_1 = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT}\right) \quad (3)$$

$$v_{th} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، m جرم مؤثر الکترون است. $T(E_x)$ با استفاده از تقریب WKB^۶ برای سد پتانسیل مثلثی به‌دست می‌آید. این پارامتر در فاصله ΔE_C (بالتر از نوک سد) برابر یک بوده و در درون سد پتانسیل مقدار آن از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$T(E_x) = \exp\left[-\frac{4(2m)^{1/2} (E_C - \Delta E_C - E_x)^{3/2}}{3q\hbar F}\right] \quad (5)$$

که در آن q بار الکترونیکی پایه، \hbar ثابت پلانک کاهش‌یافته و F میدان الکترونیکی است. ΔE_C نیز به‌صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود.

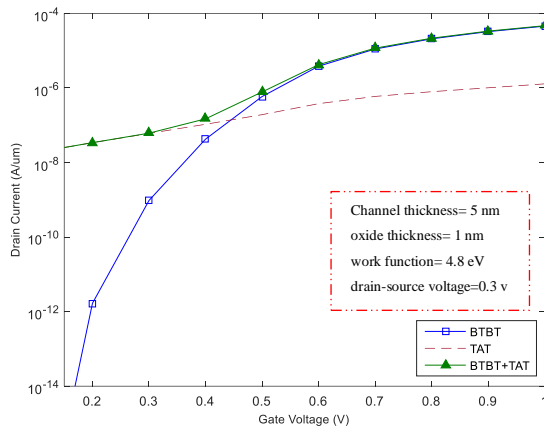
$$\Delta E_C = q\sqrt{\frac{qF}{\pi\epsilon}} \quad (6)$$

که در آن ϵ ثابت دی‌الکتریک ماده است. رابطه Γ_n را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد. Γ_{nt} که مربوط به فرایند تونل‌زنی در ناحیه سد پتانسیل بوده و Γ_{nPF} که مربوط به اثر پول-فرنکل است.

$$\Gamma_n = \Gamma_{nt} + \Gamma_{nPF} \quad (7)$$

است. تلاقی نمودارهای این دو جریان در نزدیکی ولتاژ آستانه روی می‌دهد. TAT تندی شیب نمودار جریان را می‌پوشاند و بدین صورت شیب نوسان زیر آستانه کاهش می‌یابد.

برای مدل‌سازی جریان BTBT از مدل تحلیلی ارائه شده در مرجع [۱۵] استفاده شده است.



شکل ۳: مقایسه جریان های BTBT و TAT در یک TFET تک گیتی با ساختار همگون از جنس $In_{0.53}Ga_{0.47}As$

۳-۱- اثر دما بر جریان TAT

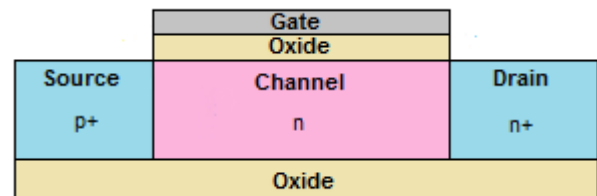
برخلاف فرایند تونل‌زنی باندبه‌باند، تونل‌زنی از طریق تله‌ها به شدت به تغییرات دما وابسته است. با افزایش دما میزان انتقال حامل‌ها از طریق تله‌ها افزایش یافته و بدین ترتیب جریان در حالت زیر آستانه افزایش می‌یابد. شکل ۴ تغییرات جریان کل (مجموع جریان‌های BTBT و TAT) را در دماهای مختلف نشان می‌دهد. در دماهای پایین‌تر به واسطه کاهش فرایند TAT (تونل‌زنی از طریق تله‌ها) آهنگ تولید الکترون-حفره نیز کاهش می‌یابد. برای دماهای کم‌تر از ۲۰۰ K شیب حقیقی نوسان زیر آستانه (δ_{SS}) قابل مشاهده است. جریان در بالای ولتاژ آستانه وابستگی ضعیفی به دما دارد در حالی که در زیر ولتاژ آستانه این وابستگی شدید است. علت این امر مکانیزم‌های غالب جریان در هر بخش می‌باشد. از آنجایی که BTBT مکانیزم غالب جریان در ولتاژهای بالای آستانه است انتظار می‌رود جریان در این ولتاژها وابستگی کمی به دما داشته‌باشد. درعین حال چون در ولتاژهای زیر آستانه TAT مکانیزم غالب جریان است انتظار می‌رود در این ولتاژها جریان وابستگی زیادی به تغییرات دما نشان دهد.

رسم نمودار جریان در دماهای مختلف برای نشان دادن وابستگی فرایند TAT به دما است و این که مدل ریاضی ارائه شده توانسته است این رفتار را به درستی پیش‌بینی کند. هدف دیگر رسم این نمودار نشان دادن تفاوت میان فرایندهای BTBT و TAT است که علی‌رغم این که تونل‌زنی در هر دو این فرایندها نقش مؤثر دارد اما مشاهده می‌شود که فرایند BTBT وابستگی دمایی چندانی ندارد در حالی که فرایند TAT تا حد زیادی به دما وابسته است.

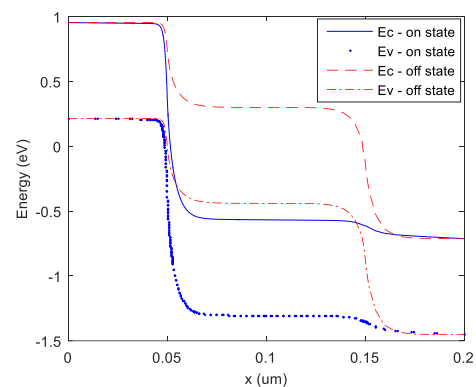
جدول ۱: جدول مشخصات فیزیکی ماده $In_{0.53}Ga_{0.47}As$

پارامتر	توضیح	مقدار
E_G	شکاف باند انرژی	۰/۷۴ eV
χ	میل ترکیبی الکترون	۴/۵ eV
ϵ	گذر دهی الکتریکی	$13/9 \epsilon_0$ F/m
m	جرم الکترون	۰/۰۴۱ m_0 gr
n_i	چگالی ذاتی	$6/3 \times 10^{11}$ $1/cm^3$

کانال افزاره موردنظر با آلایش $1/5 \times 10^{17} cm^{-3}$ ذاتی می‌باشد. ناحیه سورس به میزان $10^{20} cm^{-3}$ با ناخالصی نوع p آلایش شده است. ناحیه درین نیز به میزان $10^{19} cm^{-3}$ با ناخالصی نوع n آلایش شده است. طول افزاره ۲۰۰ nm است که طول کانال ۱۰۰ nm و طول هر یک از نواحی سورس و درین ۵۰ nm است. ضخامت لایه اکسید ۱ nm و ضخامت بدنه ۵ nm است. اکسید به کاررفته در این افزاره دارای ضریب دی‌الکتریک ۳/۹ است. ولتاژ درین ۰/۳ V بوده و ولتاژ گیت از ۰ تا ۱ ولت تغییر می‌کند. ولتاژ سورس افزاره نیز صفر است.



(الف)

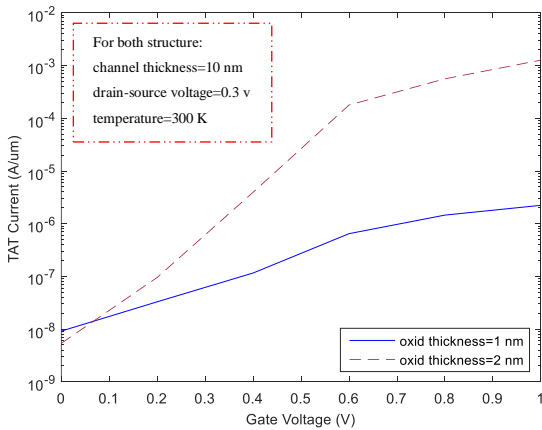


(ب)

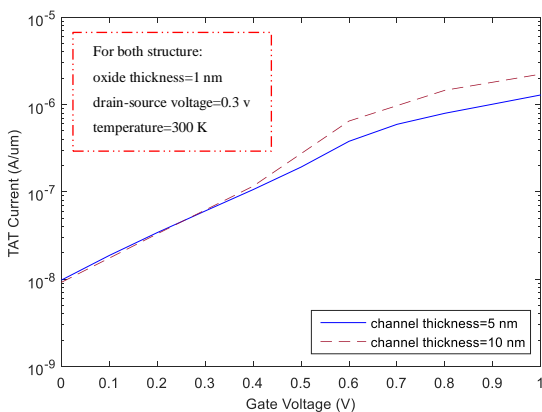
شکل ۴: (الف) TFET تک گیتی با ساختار همگون از جنس $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ و (ب) نمودار باندهای انرژی افزاره در حالت روشن ($V_{GS} = 0 V$) و حالت خاموش ($V_{GS} = 1 V$)

از آنجایی که هم فرایند BTBT و هم فرایند TAT مبتنی بر پدیده تونل‌زنی هستند پس افزایش ولتاژ گیت و به تبع آن افزایش میدان الکتریکی باعث افزایش هر دو جریان خواهد شد. شکل ۳ نشان می‌دهد که در ولتاژهای بالاتر از ولتاژ آستانه بخش عمده جریان مربوط به BTBT است و در ولتاژهای پایین‌تر از ولتاژ آستانه، TAT مکانیزم غالب جریان

ضخامت اکسید و نیمه‌هادی بر روی مقادیر جریان آن‌ها تاثیر می‌گذارد. با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ می‌توان دید که حتی برای ضخامت‌های بسیار کم اکسید و بدنه مقدار جریان TAT به اندازه‌ای هست که شیب نوسان زیر آستانه را تحت‌الشعاع قرار دهد. شکل ۶ اثر افزایش ضخامت اکسید را بر روی جریان TAT نشان می‌دهد. برای افزایش ضخامت InGaAs با ضخامت بدنه ۱۰ nm، با تغییر ضخامت اکسید از ۱ nm به ۲ nm میدان الکتریکی کاهش می‌یابد. با کاهش میدان، ΔE_c کاهش یافته و به تبع آن ΔE_n افزایش می‌یابد. بدین ترتیب مسیرهای بیش‌تری برای تونل‌زنی فراهم خواهد شد که این امر موجب افزایش جریان TAT می‌شود. همین مسئله برای افزایش ضخامت بدنه نیز صادق است. شکل ۷ نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت بدنه افزاره از ۵ nm به ۱۰ nm جریان TAT افزایش می‌یابد که البته میزان افزایش آن بسیار کم بوده و تاثیر چندانی بر جریان کل نخواهد داشت.



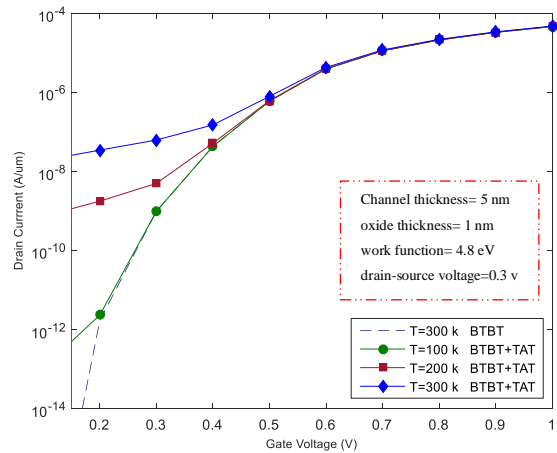
شکل ۶: تغییرات جریان TAT برای مقادیر مختلف ضخامت اکسید در یک TFET تک‌گیتی با ساختار همگون از جنس $In_{0.53}Ga_{0.47}As$



شکل ۷: تغییرات جریان TAT برای مقادیر مختلف ضخامت بدنه در یک TFET تک‌گیتی با ساختار همگون از جنس $In_{0.53}Ga_{0.47}As$

۴-۳-۴ اثر مشخصات فیزیکی ماده بر جریان TAT

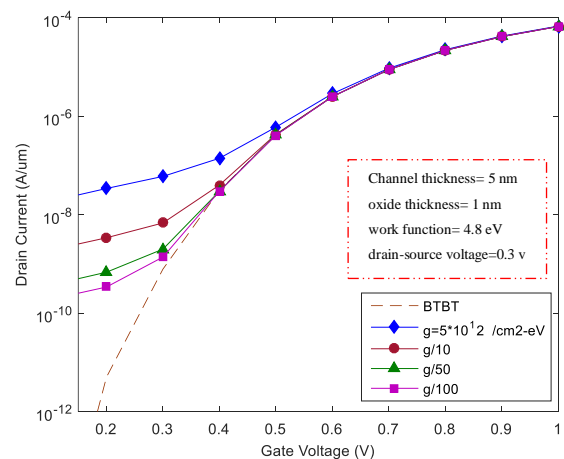
مشخصات ماده نظیر جرم مؤثر، شکاف باند و میل ترکیبی تاثیر به‌سزایی بر میزان جریان افزاره دارند. هر چه جرم مؤثر حامل‌ها کم‌تر باشد میزان



شکل ۴: روند تغییرات جریان درین در دماهای مختلف در یک TFET تک‌گیتی با ساختار همگون از جنس $In_{0.53}Ga_{0.47}As$

۳-۲-۳ اثر چگالی تله‌ها بر جریان TAT

علی‌رغم این‌که تابع چگالی حالت‌های تله (g) تابعی از انرژی است نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد در بیش‌تر موارد مقدار این تابع در وسط شکاف باند بیش‌ترین تاثیر را بر جریان TAT دارد [۱۳]. از این رو مقدار g ثابت و برای مواد III-V مورد استفاده در این مقاله برابر با $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ است. با کاهش تعداد تله‌ها میزان انتقال حامل‌ها از طریق آن‌ها کاهش یافته و در نتیجه جریان TAT کاهش می‌یابد. شکل ۵ روند تغییرات جریان درین (BTBT+TAT) را به‌ازای g های مختلف نشان می‌دهد. از آنجایی‌که در ولتاژهای زیر آستانه، TAT مکانیزم غالب جریان است تغییرات جریان درین به‌ازای g های مختلف در این ولتاژها نمود بیش‌تری دارد.



شکل ۵: تغییرات جریان درین به‌ازای مقادیر مختلف g در یک TFET تک‌گیتی با ساختار همگون از جنس $In_{0.53}Ga_{0.47}As$

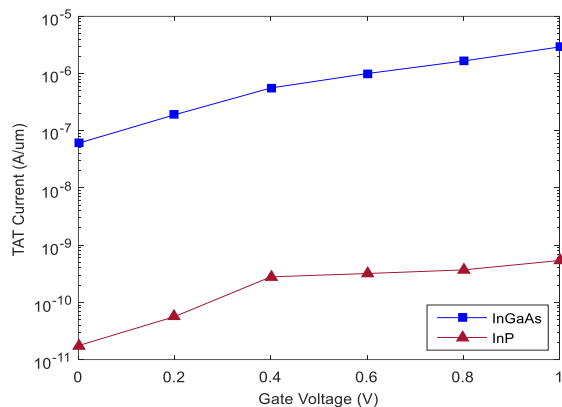
۳-۳-۳ اثر ضخامت‌های اکسید و بدنه بر جریان TAT

میدان الکتریکی در TFET ها به ضخامت اکسید و بدنه وابسته است. از آنجایی‌که هر دو فرایند TAT و BTBT به میدان الکتریکی وابسته‌اند

InP کم تر است و از آن جایی که هر دو فرایند BTBT و TAT بر مبنای فرایند تونل زنی هستند در نتیجه هر دو جریان در افزاره از جنس InP کم تر از مقدار آن ها در همان افزاره از جنس InGaAs است. نتایج شکل- ۹ های ۹ و ۱۰ صحت مطالب ذکر شده را تایید می کند. شکل ۹ مقایسه جریان های TAT و شکل ۱۰ مقایسه جریان های BTBT را در دو افزاره مشابه یکی از جنس InGaAs و دیگری از جنس InP نشان می دهد. ابعاد دو افزاره برابر ابعاد ذکر شده در بخش ۳ است. برای مقایسه دقیق تر تابع کار هر دو افزاره یکسان و برابر $4/5 \text{ eV}$ در نظر گرفته شده است. شکل ۱۱ نشان می دهد برای TFET با ساختار همگون از جنس InP نیز در ولتاژهای بالاتر از ولتاژ آستانه بخش عمده جریان مربوط به BTBT است و در ولتاژهای پایین تر از ولتاژ آستانه، TAT مکانیزم غالب جریان است.

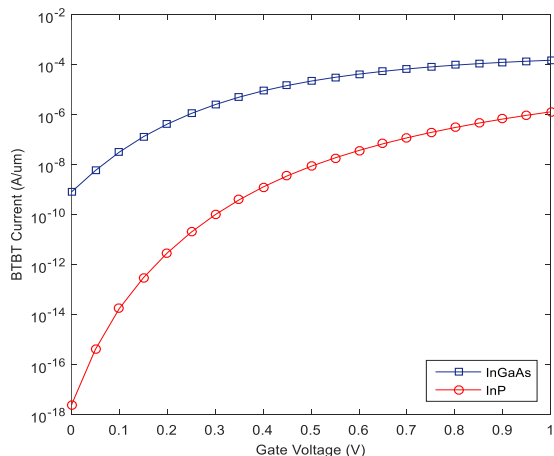
جدول ۳: جدول مشخصات فیزیکی ماده InP

E_g	$1/35 \text{ eV}$
χ	$4/4 \text{ eV}$
ϵ	$12/5 \epsilon_0 \text{ F/m}$
m	$0.08 m_0 \text{ gr}$
n_i	$1.03 \times 10^{-7} \text{ 1/cm}^3$



شکل ۹: مقایسه جریان های TAT در دو TFET تک گیتی با ساختار

همگون و با ابعاد مشابه از جنس InP و InGaAs



شکل ۱۰: مقایسه جریان های BTBT در دو TFET تک گیتی با ساختار

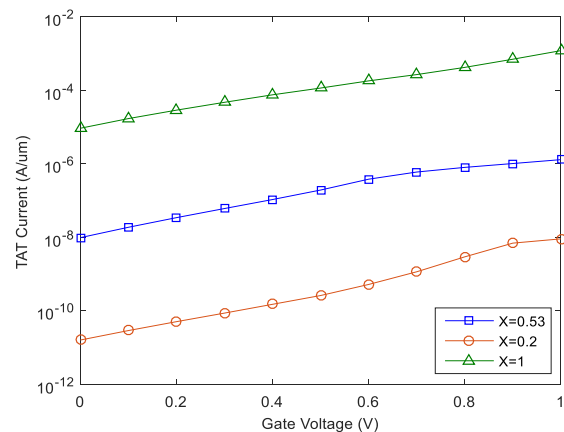
همگون و با ابعاد مشابه از جنس InP و InGaAs

انتقال آن ها بیش تر است. شکاف باند کم تر و میل ترکیبی بیش تر باعث می شود باندهای انرژی به گونه ای قرار گیرند که فاصله تونل زنی کاهش یابد که این امر باعث افزایش میزان تونل زنی حامل ها می شود. از آن جایی که هر دو فرایند BTBT و TAT مبتنی بر فرایند تونل زنی هستند تحت شرایط بالا یعنی جرم مؤثر و شکاف باند کم تر و میل ترکیبی بیش تر، هر دو مؤلفه جریان افزایش می یابند. شکل ۸ تغییرات جریان TAT را به ازای نسبت مولی های مختلف ماده $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (ماده بدنه) نشان می دهد. در جدول شماره ۲ می توان مقادیر پارامترهای مربوط به هر نسبت مولی را مشاهده کرد. مقایسه این مقادیر با نتایج حاصل از مدل سازی صحت مطالب گفته شده در بالا را تصدیق می کند.

جدول ۲: مشخصات فیزیکی ماده $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ به ازای نسبت مولی های

مختلف

	$x=1$	$x=0.53$	$x=0.2$
E_g	0.36 eV	0.74 eV	1.14 eV
χ	$4/9 \text{ eV}$	$4/5 \text{ eV}$	$4/23 \text{ eV}$
n_i	$7.17 \times 10^{-14} \text{ 1/cm}^3$	$6.3 \times 10^{-11} \text{ 1/cm}^3$	$3.27 \times 10^{-8} \text{ 1/cm}^3$
ϵ	$15/1 \epsilon_0 \text{ F/m}$	$13/9 \epsilon_0 \text{ F/m}$	$13/23 \epsilon_0 \text{ F/m}$
m	$0.23 m_0 \text{ gr}$	$0.41 m_0 \text{ gr}$	$0.54 m_0 \text{ gr}$



شکل ۸: مقایسه جریان های TAT برای نسبت مولی های مختلف

InGaAs در یک TFET تک گیتی با ساختار همگون

۳-۵- TFET تک گیتی با ساختار همگون از جنس InP

برای بررسی بیش تر تاثیر مشخصات فیزیکی ماده بر روی جریان افزاره مدل های BTBT و TAT برای افزاره ای با همین ابعاد (ابعادی که در بخش ۳ مشخص شد) ولی این بار از جنس InP به کار رفته است. این ماده نیز جزء مواد III-V می باشد که مشخصات آن در جدول ۳ آمده است. همان طور که شکل های ۹ و ۱۱ نشان می دهند روند تغییرات جریان TAT در این ماده نیز تا حدود زیادی مشابه حالت InGaAs است و همان تاثیر را بر روی جریان افزاره می گذارد. مقایسه مقادیر جدول ۱ و ۳ نشان می دهد که InP در مقایسه با InGaAs شکاف باند بزرگ تر و جرم مؤثر بیش تری دارد. این مسئله باعث می شود فاصله تونل زنی بیش تر و میزان انتقال حامل ها کم تر باشد. به عبارتی میزان تونل زنی حامل ها در

- [3] S. H. Kim, *Germanium-Source Tunnel Field Effect Transistors for Ultra-Low Power Digital Logic*, Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley, 2012.
- [4] T. J. Vasen, *Investigation of III-V Tunneling Field-Effect Transistors*, Ph.D. Thesis, University of Notre Dame, Indiana, 2014.
- [5] W. E. Spear, P. G. LeComber and A. J. Snell, "An Investigation of the amorphous-silicon barrier and pn junction," *Philosophical Magazine B* 38, pp. 303-317, 1978.
- [6] G. Vincent, A. Chantre and D. Bois, "Electric field effect on the thermal emission of traps in semiconductor junctions," *Journal of Applied Physics*, vol. 50, no. 8, pp. 5484-5487, 1979.
- [7] P. T. Landsberg, *Recombination in Semiconductors*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp. 172-182, 1991.
- [8] J. Y. Hou, J. K. Arch, S. J. Fonash, S. Wiedeman and M. Bennett, "An examination of the tunnel junctions in triple junction a-Si:H based solar cells: modeling and effects on performance," *Conference Record of the 22nd IEEE, Photovoltaic Specialists Conference, Las Vegas*, pp. 1260-1264, 1991.
- [9] J. A. Willemsen, M. Zeman and J. W. Metselaar, "Computer modeling of amorphous silicon tandem cells," *Proceedings of the first WCPEC-1, Hawaii*, pp. 599-602, 1994.
- [10] H. Xu and Y. Dai, "Two-dimensional analytical model of double-gate tunnel FETs with interface trapped charges including effects of channel mobile charge carriers," *Journal of Semiconductors*, vol. 38, no. 2, 2017.
- [11] J. Furlan, "Tunneling generation-recombination currents in a-Si junctions," *Progress in Quantum Electronics*, vol. 25, no. 2, pp. 55-96, 2001.
- [12] M. Baudrit, and C. Algora, "Tunnel Diode Modeling, Including Nonlocal Trap-Assisted Tunneling: A Focus on III-V Multi-junction Solar Cell Simulation," *IEEE Transaction on electron devices*, vol. 57, no. 10, 2010.
- [13] R. N. Sajjad, W. Chern, J. L. Hoyt and D. A. Antoniadis, "Trap Assisted Tunneling and Its Effect on Subthreshold Swing of Tunnel FETs," *IEEE Transaction on electron devices*, vol. 63, no. 11, 2016.
- [14] R. N. Sajjad, U. Radhakrishna and D. A. Antoniadis, "A tunnel FET compact model including non-idealities with Verilog implementation," *Solid State Electronics*, vol. 150, pp. 16-22, Dec. 2018.
- [15] S. Mohammadi and H. R. T. Khaveh, "An Analytical Model for Double-Gate Tunnel FETs Considering the Junctions Depletion Regions and the Channel Mobile Charge Carriers," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 64, no. 3, pp. 5021-5029, Mar. 2017.

زیر نویس‌ها

¹ Shockley-Read-Hall

² Gate-All-Around

³ Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect-Transistor

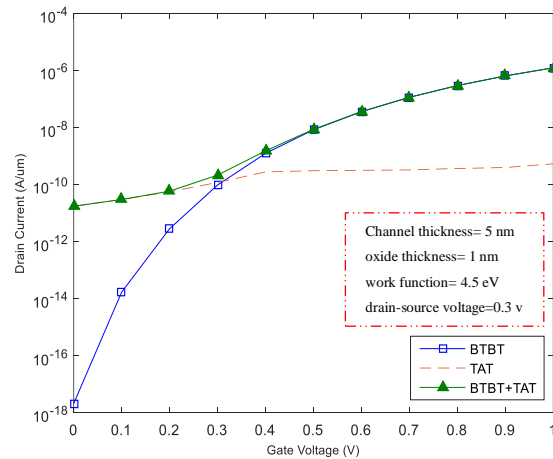
⁴ Tunneling-Field-Effect-Transistor

⁵ Trap-Assisted Tunneling

⁶ Band-to-Band Tunneling

⁷ Wentzel-Kramers-Brillouin

⁸ Sub-threshold Swing



شکل ۱۱: مقایسه جریان‌های BTBT و TAT در یک TFET تک‌گیتی با ساختار همگون از جنس InP

۴- نتیجه

مسئله‌ای که در بسیاری از مقالات مدل‌سازی از آن صرف‌نظر شده‌است، وجود تله‌های انرژی درون شکاف باند می‌باشد که می‌تواند تاثیر به‌سزایی بر مشخصات الکتریکی افزاره داشته‌باشد. در واقع وجود حالت‌های انرژی درون شکاف باند بر تبادل بار میان باندهای ظرفیت و هدایت تاثیر گذاشته و باعث تغییر چگالی بار و نرخ تولید و بازترکیب می‌شود. تاثیر تله‌ها بر جریان در ناحیه زیر آستانه نمود بیشتری دارد. در این حالت تله‌ها باعث انتقال حامل‌ها پیش از شروع پروسه تونل‌زنی مستقیم می‌شوند که این امر باعث افزایش جریان در ناحیه زیر آستانه می‌شود. به عبارت دیگر جریان حالت خاموش ترانزیستور افزایش می‌یابد. در واقع عمده جریان حالت خاموش در ترانزیستورهای TFET را می‌توان ناشی از فرایند تونل‌زنی از طریق تله‌ها (TAT) دانست. در این مقاله یک مطالعه دقیق از مکانیزم تونل‌زنی به کمک تله‌ها در ترانزیستورهای TFET ارائه شد که نشان می‌دهد چگونه این پدیده باعث تولید یک جریان نشتی بالا قبل از شروع فرایند تونل‌زنی باندباند (BTBT) می‌شود. با یک اصلاح در فرمول SRH نشان داده شده‌است که در دمای اتاق جریان TAT در ولتاژهای زیر آستانه همواره غالب بوده و شیب جریان BTBT در حالت روشن را می‌پوشاند.

مراجع

- [۱] سید امیر هاشمی، «مدل تحلیلی پتانسیل و ولتاژ آستانه ترانزیستور ماسفت دو گیتی با گیت دو ماده ای بدون آلایش»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۷، شماره ۴، صفحات ۱۷۵۹-۱۷۶۹، زمستان ۱۳۹۶.
- [۲] مهسا مراد و میثم زارعی، «ارائه ساختاری جدید از ترانزیستورهای اثرمیدان در مقیاس نانو به منظور بالا بردن قابلیت اطمینان»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۸، شماره ۳، صفحات ۱۳۹۹-۱۴۰۴، پاییز ۱۳۹۷.