

بررسی و مقایسه مشخصات الکترونیکی ترانزیستورهای نانو سیم بدون پیوند نوع P با مواد کانال InGaP, InP, Si

فرشاد باجلان^۱ آرش یزدان پناه گوهرریزی^۲ رحیم فایز^۳ غفار درویش^۴

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده فنی- دانشگاه آزاداسلامی واحد علوم و تحقیقات- تهران- ایران

aghil.bajelan@yahoo.com

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید بهشتی- تهران- ایران

ar_yazdanpanah@sbu.ac.ir

۳- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شریف- تهران- ایران

faez@sharif.edu

۴- استادیار- دانشکده فنی- دانشگاه آزاد علوم تحقیقات- تهران- ایران

Darvish_gh@srbiau.ac.ir

چکیده: در این مقاله با استفاده از روش تابع گرین غیر تعادلی، عملکرد ترانزیستورهای بدون پیوند با کانال مواد InGaP, InP و Si مورد بررسی قرار گرفته است. گیت ترانزیستورها از نوع تمام اطراف گیت (GAA) انتخاب شده است. پارامترهایی چون دیبل، شیب زیر آستانه، جریان حالت خاموش، جریان حالت روشن و نسبت جریان حالت روشن به خاموش در این ادوات مورد بررسی قرار گرفته است. مشکل اصلی ترانزیستورهای بدون پیوند، جریان حالت خاموش و شیب زیر آستانه می باشد. با انتخاب مواد با شکاف باند بزرگ و چگالی حالت بالا در باند ظرفیت می توان جریان حالت خاموش را کاهش داد، بدون اینکه جریان حالت روشن کاهش محسوسی پیدا کند. از این رو ترانزیستور بدون پیوند با کانال InGaP دارای مشخصات الکترونیکی بهتری از نظر جریان حالت خاموش و شیب زیر آستانه است. برای این ترانزیستور مقادیر دیبل، شیب زیر آستانه، جریان حالت خاموش، جریان حالت روشن و نسبت جریان روشن به خاموش در طول گیت ۱۰ نانومتر به ترتیب برابر است با 1.4mV/V ، $2.76 \times 10^{-15}\text{A}$ ، $5.94 \times 10^{-6}\text{A}$ و 2.62×10^{-9} .

کلمات کلیدی: ترانزیستورهای بدون پیوند، دیبل، شیب زیر آستانه، جریان خاموشی، نسبت جریان روشنی به خاموشی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۴/۱۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۲۱

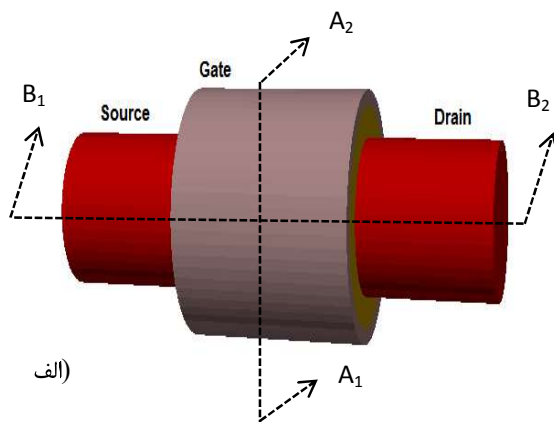
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۱۱

نام نویسنده مسئول: دکتر آرش یزدان پناه گوهرریزی

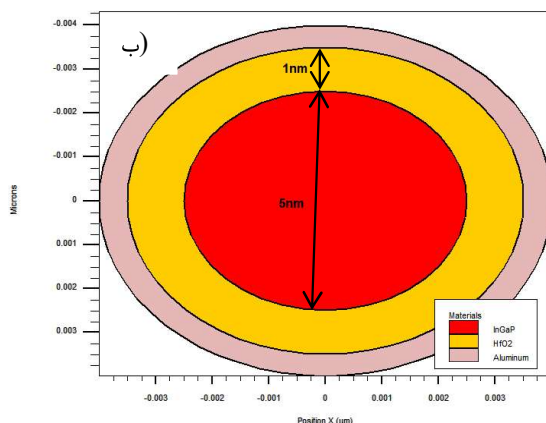
نشانی نویسنده مسئول: ایران-تهران- بزرگراه شهید چمران-خیابان یمن-میدان شهید شهریار- بلوار دانشجو- کد پستی ۱۹۸۳۹۶۹۴۱۱

- دانشگاه شهید بهشتی- دانشکده مهندسی برق.

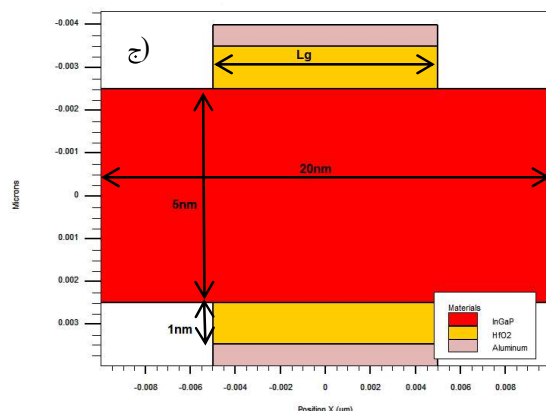
۱- مقدمه:



الف)



ب)



ج)

شکل (۱): الف) ساختار ترانزیستور نانوسیم بدون پیوند. ب)

شما تیک ترانزیستور از برش (A_1-A_2). ج) شما تیک ترانزیستور از برش (B_1-B_2).

۳- روش شبیه سازی

استفاده از معادلات تابع گرین غیر تعادلی به روشی معمول برای شبیه سازی ترانزیستورها در ابعاد نانو تبدیل شده است. با اعمال تقریب جرم موثر تقریب مناسبی از ساختار نوار انرژی بدست می آید که با توجه به آن همیلتونین سیستم قابل بردن است. روش فضای مد بر اساس تجزیه زیر باندها است که به جای روش فضای واقعی به منظور کاهش زمان محاسباتی در حل معادلات شرودینگر سه بعدی برای

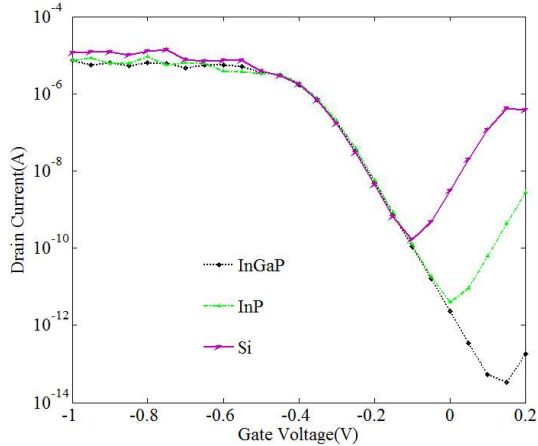
براساس اطلاعات ITRS، ابعاد ترانزیستورهای ماسفت به سرعت در حال کاهش است. لذا کوچک نمایی ترانزیستورها، غیرقابل انکار است [۴-۱]. با کوچک شدن ابعاد ماسفتها در حد نانومتر اثرات کانال کوتاه خود را بیشتر نشان می دهند [۵،۶]. علاوه بر آن با کوچک شدن ترانزیستورهای ماسفت در حد نانو ساخت نواحی مختلف پیوندهای سورس - کانال و درین - کانال پیچیده و پرهزینه است. نوع دیگری از ترانزیستورها به نام بدون پیوند (JL) معرفی می شود که در آن تمام نواحی سورس، کانال و درین دارای آلایش یکسان و مقدار برابر است. لذا این نوع ادوات از نظر فرآیند ساخت، پیچیدگی کمتری دارند [۷،۸]. مشکل اصلی ترانزیستورهای نانو سیم بدون پیوند، جریان حالت خاموش بالا بوده که منجر به کاهش نسبت جریان روشن به خاموش و افزایش سوینگ زیرآستانه می شود [۹،۱۳]. یکی از راه حلها برای کاهش جریان حالت خاموش، افزایش شکاف نوار انرژی ماده کانال است. ولی در این بین باید چگالی حالتها نیز کم نباشد تا جریان حالت روشن کم نشود. افزایش شکاف نوار انرژی را می توان از دو طریق ایجاد نمود:

۱- استفاده از مواد معمول مانند سیلیکن و ژرمانیوم با ضخامتی در حدود زیر ۳ نانومتر به عنوان کانال (بدلیل محدودیت کوانتومی شکاف نوار انرژی آنها افزایش می یابد) [۱۴]

۲- استفاده از مواد با شکاف باند بزرگ. در مورد روش اول، بدلیل محدودیت های کوانتومی فاصله بین زیر باندها زیاد شده و جریان حالت روشن، کاهش می یابد. ما در این مقاله از مواد InP, InGaP با شکاف باند بزرگ و چگالی حالت والانس بالا به عنوان کانال نوع P استفاده می کنیم. در ادامه، ترانزیستورهای نانو سیم بدون پیوند با مواد کانال InP, InGaP, Si از نظر مشخصات مختلف الکترونیکی مقایسه می شوند.

۲- ساختار افزاره

شکل (۱)، ساختار ترانزیستور نانوسیم بدون پیوند با تمام اطراف گیت (GAA) را نشان می دهد. ضخامت کانال در هر سه ترانزیستور با کانال مواد مختلف، یکسان و برابر ۵ نانومتر و جنس ماده اکسید HfO_2 و ضخامت آن نیز ۱ نانومتر است. فاصله بین سورس تا درین ۲۰ نانومتر است که فلز گیت در وسط این فاصله قرار دارد. آلایش سورس، کانال و درین در هر سه ترانزیستور برابر است با $10^{19} cm^{-3}$. شکاف نوار انرژی برای سه ترانزیستور با مواد کانال InP, InGaP و Si برابر است با $1.12 eV$ ، $1.35 eV$ ، $1.16 eV$ ، در تمام مقاله درصد مولی In ۳۰ درصد و درصد مولی Ga ۷۰ درصد ($In_{0.3}Ga_{0.7}P$) در نظر گرفته شده است.



شکل (۲): منحنی جریان برحسب ولتاژ گیت ترانزیستورهای بدون پیوند با مواد کانال InGaP، InP و Si در طول گیت ۱۰ نانومتر.

در ادامه برای آنکه درک عمیق تری نسبت به بهبود جریان حالت خاموش ترانزیستور بدون پیوند با ماده کانال InGaP نسبت به InP و Si که منجر به بهبود پارامترهایی چون دیبیل، شیب زیر آستانه و نسبت جریان حالت روشن به خاموش می شود پیدا کنیم، به بررسی چگالی حامل ها در کانال می پردازیم. برای ترانزیستورهای بدون پیوند در حالت خاموش نقش الکترون ها و حفرها هر دو به یک اندازه مهم می باشد، زیرا در حالت خاموش ولتاژ گیت باید بگونه ای باشد که کانال ترانزیستور از حامل بار الکتریکی تخلیه شود. بنابراین چگالی حامل های الکترون و حفره در حالت خاموش در مرکز کانال مورد بررسی قرار می گیرد.

شکل (۳) چگالی حامل های الکترون در حالت خاموش برای ترانزیستورهای بدون پیوند با کانال مواد InGaP، InP، Si در برش (A₁-A₂) را نمایش می دهد. طبق شکل ها، غالب حامل های الکترون در ترانزیستورهای بدون پیوند در مرکز کانال حضور دارند. مقدار حامل های الکترون در حالت خاموش در ترانزیستور بدون پیوند با مواد InGaP، InP و Si خیلی کم است. حامل های الکترون در حالت خاموش در ترانزیستور بدون پیوند با مواد InGaP، InP و Si به ترتیب از مرتبه ی ۱۰^{۱۱} cm⁻³، ۱۰^{۱۳.۵} cm⁻³ و ۱۰^{۱۵} cm⁻³ است. همانگونه که مشاهده می شود چگالی حامل های الکترون در ترانزیستور با ماده کانال InGaP نسبت به دو نوع دیگر کمتر است که منجر به کاهش جریان حالت خاموش می شود.

ترانزیستورهای نیمه هادی استفاده می شود [۱۶، ۱۵]. در شبیه سازی ترانزیستورها، زمانی که در دو بعد کاهش ابعاد داریم، مانند نانو سیم ها به دلیل محدودیت های کوانتومی فقط تعداد کمی از زیر باندها در انتقال شرکت می کنند، لذا باید فقط آنها در محاسبات آورده شوند. برای این منظور از فرمول بندی تابع گرین غیر تعادلی در فضای مد استفاده می شود [۱۷]. معادله شرودینگر در مختصات استوانه ای برابر است با:

$$\frac{\hbar^2}{2} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{m_{eff,r}(r,z)} r \frac{\partial R_m}{\partial r} \right) - \left(\frac{1}{m_{eff,r}(r,z)} \frac{m_{eff,r}^2}{r^2} \right) \right] R_m - E_r R_m = E_m R_m \quad (1)$$

که E_r ، E_m ، R_m و $m_{eff,r}$ به ترتیب انرژی نوار ظرفیت، تابع ویژه، مقدار ویژه و جرم موثر است. بعد از تشکیل همیلتونین با توجه به معادله (۱)، برای شبیه سازی افزاره نیاز به حل معادلات انتقال کوانتومی می باشد. ضریب عبور در هر انرژی با توجه به رابطه زیر بدست می آید:

$$T(E) = Tr \left[\left(\sum_S - \sum_S^\dagger \right) G \left(\sum_D - \sum_D^\dagger \right) G^\dagger \right] \quad (2)$$

که G_S و G_D انرژی خودی اتصال های سورس و درین و تابع گرین است. از معادلات انتقال کوانتومی برای بدست آوردن مشخصه های جریان و چگالی حامل و دیگر مشخصه های فیزیکی استفاده می گردد. جریان از رابطه زیر محاسبه می شود:

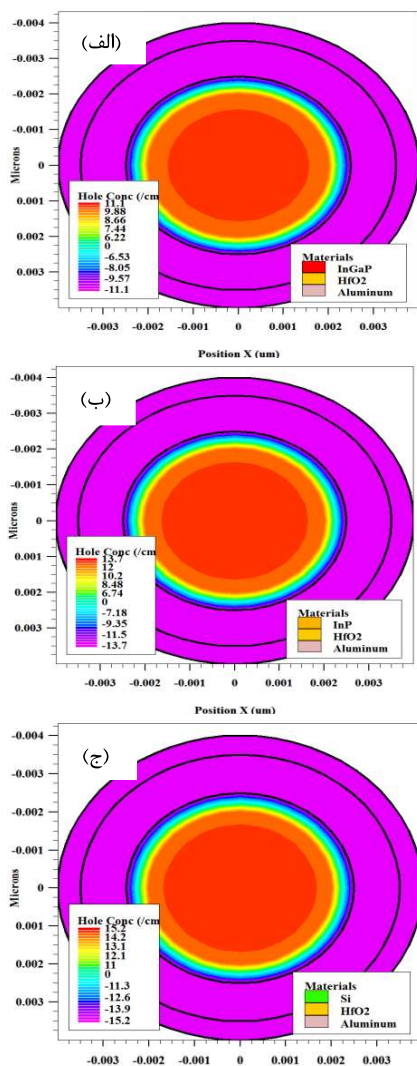
$$I_D = \frac{q}{h} \int T(E) (f(E - \mu_S) - f(E - \mu_D)) dE \quad (3)$$

که $f(E - \mu_S)$ و $f(E - \mu_D)$ ثابت پلانک، بار الکترون و تابع فرمی سورس و درین است.

۴- بحث و نتایج شبیه سازی

در این قسمت ابتدا منحنی مشخصه جریان برحسب ولتاژ گیت ترانزیستورها و سپس توزیع الکترون ها و حفره ها در حالت خاموش آورده شده است. بعد از آن مشخصات الکترونیکی این ترانزیستورها در طول گیت ۱۰ نانومتر مود مقایسه قرار گرفته. در نهایت اثر تغییر طول گیت بر مشخصات الکترونیکی با مواد مختلف رسم شده است.

شکل (۲) منحنی جریان برحسب ولتاژ گیت ترانزیستورهای بدون پیوند با مواد کانال InGaP، InP و Si در طول گیت ۱۰ نانومتر را نمایش می دهد. با توجه به شکل (۲)، جریان حالت خاموش ترانزیستور بدون پیوند با ماده کانال InGaP از همه کم تر است.

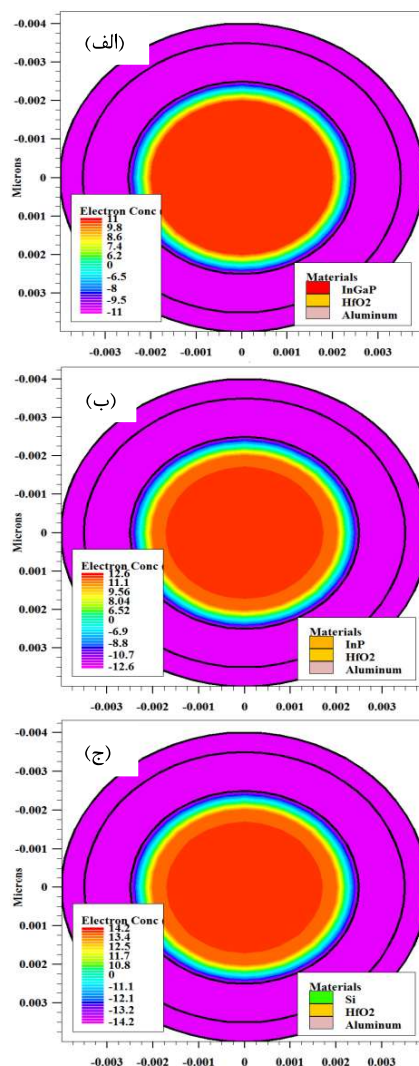


شکل (۴): چگالی حامل حفره در حالت خاموش برای ترانزیستورهای بدون پیوند با کانال مواد InP, InGaP و Si در برش (A₁-A₂).

جدول (۱) مقدار مشخصه‌های الکترونیکی ترانزیستورهای بدون پیوند با مواد مختلف در طول گیت ۱۰ نانو متر را نمایش می‌دهد. کمترین مقدار جریان حالت خاموش و دیپل ترانزیستورهای بدون پیوند به ترتیب به کانال مواد InP, InGaP, Si و InP تعلق دارد. مقدار شیب زیر آستانه ترانزیستور با کانال InGaP از دو ترانزیستور با کانال مواد InP, Si کمتر است، دلیل آن تفاوت در مقدار چگالی حامل ذاتی و همچنین انرژی شکاف نوار مواد کانال است.

مقدار چگالی حامل ذاتی برای مواد InGaP, InP و Si به ترتیب برابر است با $7/4 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$, 10^7 cm^{-3} و $1/45 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$. همچنین انرژی شکاف نوار برای مواد InGaP, InP و Si به ترتیب برابر است با ۱/۶۱ eV, ۱/۳۵ eV و ۱/۱۲ eV.

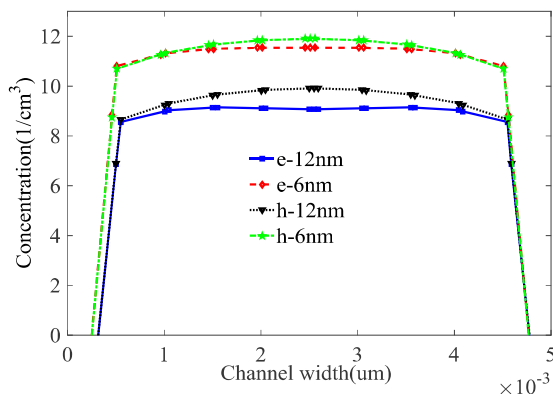
مقدار جریان حالت روشن در ترانزیستور بدون پیوند با ماده کانال Si از بقیه کمی بیشتر است، که این امر به دلیل بالاتر بودن



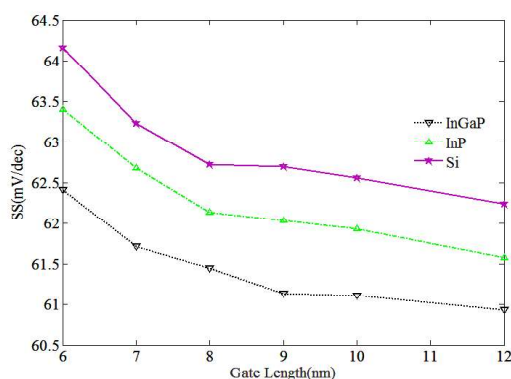
شکل (۳): چگالی حامل الکترون در حالت خاموش برای ترانزیستورهای بدون پیوند با کانال مواد InP, InGaP و Si در برش (A₁-A₂).

شکل (۴) چگالی حامل حفره در حالت خاموش (الف، ب، ج) برای ترانزیستورهای بدون پیوند با کانال مواد InGaP, InP و Si را در برش (A₁-A₂) نمایش می‌دهد. مطابق شکل، غالب چگالی حامل‌های حفره در حالت خاموش و روشن در مرکز کانال قرار دارند. مقدار حامل‌های حفره در حالت خاموش در ترانزیستور بدون پیوند با مواد InGaP, InP و Si به ترتیب از مرتبه 10^{11} cm^{-3} و $10^{14,4} \text{ cm}^{-3}$ است.

همانطور که ملاحظه می‌شود چگالی حامل‌های حفره در ترانزیستور بدون پیوند با ماده کانال InGaP نسبت به دو نوع دیگر کاهش یافته که باعث کاهش جریان حالت خاموش در این نوع از ترانزیستور شده است.

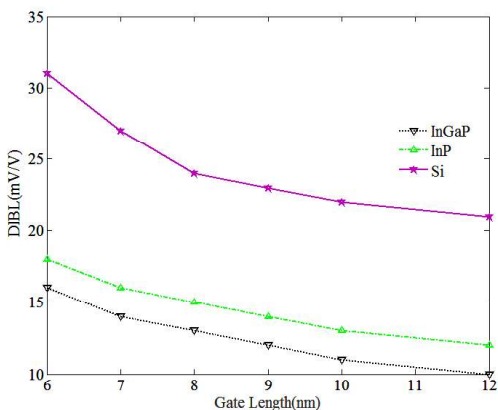


شکل (۶): منحنی چگالی حامل‌های الکترون و حفره بر حسب عرض کانال در طول گیت‌های ۶ و ۱۲ نانومتر با ماده کانال InGaP در حالت خاموش.



شکل (۷): نمودار شیب زیر آستانه ترانزیستورهای بدون پیوند با مواد InGaP و Si در طول گیت‌های ۶ تا ۱۲ نانومتر.

منحنی دیبل ترانزیستورهای بدون پیوند با مواد کانال InGaP, InP و Si در طول گیت‌های ۶ تا ۱۲ نانومتر در شکل (۸) نشان داده شده است. با کاهش طول گیت در همه‌ی ترانزیستورها مقدار دیبل افزایش می‌یابد.



شکل (۸): نمودار دیبل ترانزیستورهای بدون پیوند با مواد InGaP و Si در طول گیت‌های ۶ تا ۱۲ نانومتر.

چگالی حالت‌های ظرفیت در ماده Si نسبت به دو ماده دیگر است.

جدول (۱): مشخصه‌های الکترونیکی ترانزیستورهای بدون پیوند با مواد کانال InGaP, InP و Si.

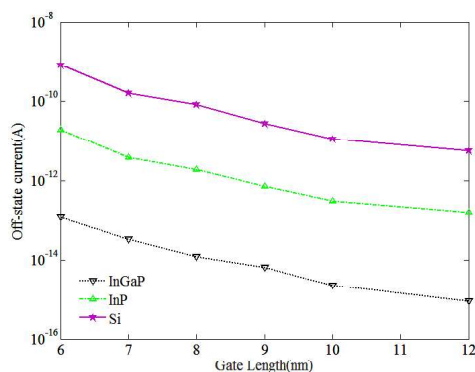
	$I_{OFF}(A)$	SS mV/dec	DIBL mV/V	$I_{ON}(A)$	ON/OFF
InGaP	$2/26 \times 10^{-15}$	۶۱/۱	۱۱/۱	$5/94 \times 10^{-6}$	$2/62 \times 10^{-9}$
InP	$3/3 \times 10^{-13}$	۶۱/۹	۱۳/۲	$9/26 \times 10^{-6}$	$3/06 \times 10^{-7}$
Si	$1/15 \times 10^{-11}$	۶۲/۵	۲۲/۱	$1/57 \times 10^{-5}$	$1/37 \times 10^{-6}$

در ادامه اثر تغییر طول گیت بر مشخصه‌های الکترونیکی ترانزیستورهای بدون پیوند با مواد مختلف بررسی می‌شود.

نمودار جریان حالت خاموش بر حسب طول گیت ترانزیستورهای بدون پیوند با مواد کانال InGaP, InP و Si در شکل (۵) نشان داده شده است. با کاهش طول گیت در همه‌ی ترانزیستورها، مقدار جریان حالت خاموش افزایش می‌یابد.

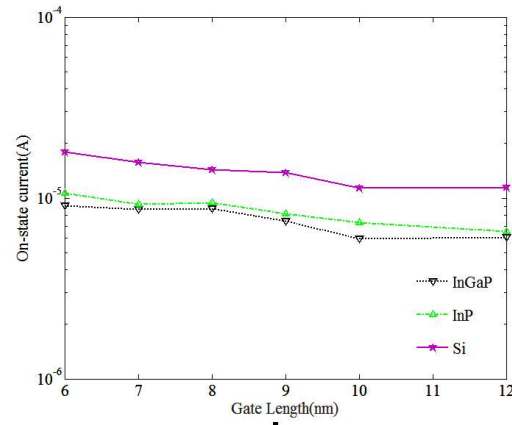
برای روشن شدن دلیل این امر منحنی چگالی حامل‌های الکترون و حفره بر حسب عرض کانال در طول گیت‌های ۶ و ۱۲ نانومتر با ماده کانال InGaP در حالت خاموش در شکل (۶) نشان داده شده است. با توجه به شکل چگالی الکترون‌ها و حفره‌های ترانزیستور بدون پیوند با ماده کانال InGaP در طول گیت ۱۲ نانومتر کمتر از همان ترانزیستور با طول گیت ۶ نانومتر است که این امر موجب کاهش جریان حالت خاموش آن می‌شود.

منحنی شیب زیر آستانه ترانزیستورهای بدون پیوند با مواد کانال InGaP, InP و Si در طول گیت‌های ۶ تا ۱۲ نانومتر در شکل (۷) نشان داده شده است.



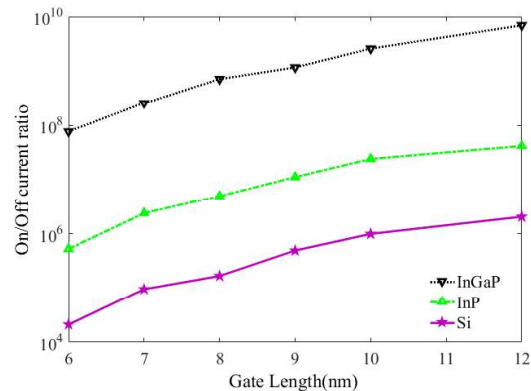
شکل (۵): نمودار جریان حالت خاموش ترانزیستورهای بدون پیوند با مواد کانال InGaP و Si در طول گیت‌های ۶ تا ۱۲ نانومتر.

منحنی جریان حالت روشن ترانزیستورهای بدون پیوند با مواد کانال InP, InGaP و Si در طول گیت‌های ۶ تا ۱۲ نانومتر در شکل (۹) قابل مشاهده است. با افزایش طول گیت در همه‌ی ترانزیستورها مقدار جریان حالت روشن کاهش می‌یابد.



شکل (۹): نمودار جریان حالت روشن ترانزیستورهای بدون پیوند با مواد کانال InP, InGaP و Si در طول گیت‌های ۶ تا ۱۲ نانومتر.

شکل (۱۰) نمودار منحنی نسبت جریان حالت روشن به خاموش ترانزیستورهای بدون پیوند با مواد کانال InP, InGaP و Si در طول گیت‌های ۶ تا ۱۲ نانومتر را نشان می‌دهد. با کاهش طول گیت در همه‌ی ترانزیستورها، مقدار نسبت جریان روشن به خاموش کاهش می‌یابد.



شکل (۱۰): نمودار میزان نسبت جریان روشن به خاموش ترانزیستورهای بدون پیوند با مواد کانال InP, InGaP و Si در طول گیت‌های ۶ تا ۱۲ نانومتر.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ترانزیستورهای بدون پیوند با گیت از نوع تمام اطراف GAA با کانال مواد InP, InGaP و Si از نظر مشخصات الکترونیکی از قبیل دیبل، شیب زیر آستانه، جریان حالت خاموش، جریان حالت روشن و نسبت جریان حالت روشن به خاموش مورد

بررسی قرار گرفته است. همچنین در این مقاله طول گیت ترانزیستورها از ۶ تا ۱۲ نانومتر تغییر داده شد و پارامترهای الکترونیکی ذکر شده محاسبه و با هم مورد مقایسه قرار گرفت. با کاهش طول گیت مشخصات الکترونیکی افزاره (دیبل، شیب زیر آستانه، جریان حالت خاموش) بدلیل کنترل کمتر گیت روی حامل‌های داخل کانال در حالت خاموش تضعیف می‌گردد. مهمترین چالش ترانزیستورهای بدون پیوند مربوط به تخلیه حامل‌های کانال در حالت خاموش است که معمولاً باعث کاهش کارایی این نوع از ترانزیستورها می‌شود. با انتخاب مناسب ماده کانال می‌توان بهبود مناسبی در عملکرد ترانزیستورهای بدون پیوند مشاهده کرد. مطالعات انجام شده در این تحقیق نشان داد که مشخصه ترانزیستورهای بدون پیوند با ماده کانال InGaP نسبت به دیگر مواد مورد مطالعه بهبود قابل توجهی یافته است.

مراجع

- [۱] ن. قبادی، ع. افضلی کوشا، "بررسی و مدلسازی اثر ناپایداری در دمای بالا و بایاس منفی (NBTI) و تزیق حامل پر انرژی (HCL) در افزاره‌های چند گیتی نانو متری"، مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال دوازدهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۴
- [۲] م. مرادی نسب، م. فتحی پور، "مدل بسته جریان-ولتاژ در ترانزیستورهای نانولوله کربنی آلاییده"، مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال هشتم، شماره دوم، پاییز و زمستان ۱۳۹۰
- [3] K. J. Kuhn, "Considerations for Ultimate CMOS Scaling," IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 59, pp. 1813-1828, 2012.
- [4] S. Sahay and M. J. Kumar, "A Novel Gate-Stack-Engineered Nanowire FET for Scaling to the Sub-10-nm Regime," IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 63, pp. 5055-5059, 2016.
- [5] T. A. Oproglidis, A. Tsormpatzoglou, D. H. Tassis, T. A. Karatsori, S. Barraud, G. Ghibaud, et al., "Analytical Drain Current Compact Model in the Depletion Operation Region of Short-Channel Triple-Gate Junctionless Transistors," IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 64, pp. 66-72, 2017.
- [6] P. Jong-Tae and J. P. Colinge, "Multiple-gate SOI MOSFETs: device design guidelines," IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 49, pp. 2222-2229, 2002.
- [7] J.-P. Colinge, C.-W. Lee, A. Afzalian, N. D. Akhavan, R. Yan, I. Ferain, et al., "Nanowire transistors without junctions," Nat Nano, vol. 5, pp. 225-229, 03/print 2010.
- [8] R. Rios, A. Cappellani, M. Armstrong, A. Budrevich, H. Gomez, R. Pai, et al., "Comparison of Junctionless and Conventional Trigate Transistors With Down to 26 nm," IEEE Electron Device Letters, vol. 32, pp. 1170-1172, 2011.
- [9] S. Sahay and M. J. Kumar, "Nanotube Junctionless FET: Proposal, Design, and Investigation," IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 64, pp. 1851-1856, 2017.
- [10] V. Thirunavukkarasu, Y. R. Jhan, Y. B. Liu, and Y. C. Wu, "Performance of Inversion, Accumulation, and Junctionless Mode n-Type and p-Type Bulk Silicon FinFETs With 3-nm Gate Length," IEEE Electron Device Letters, vol. 36, pp. 645-647, 2015.



- [11] S. Migita, Y. Morita, T. Matsukawa, M. Masahara, and H. Ota, "Experimental Demonstration of Ultrashort-Channel (3 nm) Junctionless FETs Utilizing Atomically Sharp V-Grooves on SOI," *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 13, pp. 208-215, 2014.
- [12] M. H. Han, C. Y. Chang, H. B. Chen, J. J. Wu, Y. C. Cheng, and Y. C. Wu, "Performance Comparison Between Bulk and SOI Junctionless Transistors," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 34, pp. 169-171, 2013.
- [13] L. Ansari, B. Feldman, G. Fagas, J.-P. Colinge, and J. C. Greer, "Subthreshold behavior of junctionless silicon nanowire transistors from atomic scale simulations," *Solid-State Electronics*, vol. 71, pp. 58-62, 5// 2012.
- [14] Y. R. Jhan, V. Thirunavukkarasu, C. P. Wang, and Y. C. Wu, "Performance Evaluation of Silicon and Germanium Ultrathin Body (1 nm) Junctionless Field-Effect Transistor With Ultrashort Gate Length (1 nm and 5 nm)," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 36, pp. 654-656, 2015.
- [15] A. Svizhenko, M. P. Anantram, T. R. Govindan, B. Biegel, R. Venugopal, A. J., et al., "Two-dimensional quantum mechanical modeling of nanotransistors," *Journal of Applied Physics*, vol. 91, pp. 2343-2354, 2002.
- [16] G. Fiori and G. Iannaccone, "Three-Dimensional Simulation of One-Dimensional Transport in Silicon Nanowire Transistors," *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 6, pp. 524-529, 2007.
- [17] M. P. Anantram and A. Svizhenko, "Multidimensional Modeling of Nanotransistors," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 54, pp. 2100-2115, 2007.