

مدل سازی افزاره بدون پیوندی سیلیکون روی عایق نانومقیاس پیشنهادی جهت بهبود مشخصات حالت ماندگار و فرکانسی

محمد کاظم انوری فرد

مدفون^۵ در این فناوری باعث کاهش جریان خاموش و خازن های پارازیتی و همچنین بهبود مشخصات فرکانسی می گردد. استفاده از مهندسی تابع کار، اختلاف ولتاژ دروازه^۶ و مهندسی ماده کانال به عنوان راه حل هایی مؤثر برای بهبود اثرات کانال کوتاه در افزاره های اثر میدانی مبتنی بر سیلیسیم روی عایق معرفی شده است که می تواند عملکرد الکتریکی و حرارتی افزاره را به طرز شایانی بهبود بخشد [۱] تا [۷]. اگرچه این افزاره های تغییر شکل یافته می توانند بسیار مفید واقع شوند، اما مشکلاتی که در زمینه ساخت این ادوات نانومقیاس وجود دارد می تواند نقطه توقفی برای گسترش آنها باشد. همان طور که می دانیم مطابق با نقشه راه فناوری افزاره های نیمه هادی ها، طول کانال افزاره ها به سرعت کاهش می یابد. با توجه به کوچک بودن طول کانال، انجام آرایش متفاوت نوع N و P در کنار هم بر روی ساختارها با استفاده از روش های مرسوم نظیر کاشت یون به علت طبیعت نفوذ بالای این آلاینده ها در دامای فرایند، بسیار سخت و حتی گاهی غیر ممکن و غیر اقتصادی است [۸] و [۹].

اخیراً افزاره اثر میدان بدون پیوند^۷ به عنوان یکی از ساختارهای مورد علاقه محققان که کارایی بالایی دارد، پیشنهاد شده است [۱۰]. استفاده از آرایش یکسان در کل ناحیه کانال، منبع^۸ و چاه^۹، منجر به پیاده سازی آسان این افزاره در اندازه های بسیار کوچک می گردد. همچنین با استفاده از این فناوری می توان به جریان روشنایی بالایی دست یافت. با توجه به اهمیت بسیار بالای این افزاره، امروزه تحقیقات بسیار زیادی برای بررسی بیشتر بر روی عملکرد این افزاره ها و ارتقای کارایی آنها در جریان است.

افزاره اثر میدان بدون پیوند دوماده ای [۱۱]، ترانزیستور بدون پیوند با دروازه کمکی [۱۲]، ساختارهای چنددروازه ای [۱۳]، افزاره های بدون پیوندی با کانال GaAs [۱۴] و بررسی اثرات ولتاژ دروازه پستی بر روی مکانیزم عملکرد افزاره بدون پیوند [۱۵]، همگی گوشه ای کوچک از کارهای انجام شده اخیر برای ارتقای عملکرد این نوع افزاره ها هستند.

افزاره های اثر میدان بدون پیوند مبتنی بر سیلیسیم روی عایق^{۱۰} به عنوان یکی از ساختارهای مورد علاقه که کارایی بسیار بالایی دارد معرفی شده است [۱۶]. وجود اکسید مدفون در این ساختار منجر به بهبود عملکرد الکتریکی می گردد. با وجود این، برای این که این افزاره کارایی خود را حفظ کند نیاز به کوچک سازی شدید ضخامت و پهنای ناحیه کانال

چکیده: در این مقاله برای بهبود عملکرد افزاره اثر میدانی بدون پیوند مبتنی بر سیلیسیم روی عایق نانومقیاس، تغییراتی هدفمند در ساختار افزاره انجام شده است. ساختار پیشنهادی با دو هدف مهم، یکی کاهش اثر خود گرمایی و دیگری کاهش جریان خاموش طراحی شده است. برای کاهش اثر خود گرمایی، ضخامت اکسید مدفون زیر کانال به نصف تقلیل یافته و همچنین بخشی از آن که زیر کانال و نزدیک به ناحیه منبع است با یک لایه بافر با آلاشی برابر با بستر جایگزین شده است. افزایش رسانش حرارتی مؤثر و همچنین تشکیل ناحیه تخلیه اضافی در مرز کانال پایینی با لایه بافر تعبیه شده، منجر به بهبود مشخصات حالت ماندگار و همچنین فرکانسی افزاره پیشنهادی شده است. در روش پیشنهادی که بر اصلاح شکل نوار انرژی استوار است، پارامترهای مهمی همچون جریان خاموش، نسبت جریان روشنایی به خاموش، شیب زیرآستانه، دامای شبکه بحرانی، بهره ولتاژ، رسانایی انتقالی، خازن های پارازیتی، بهره های توان، فرکانس قطع و فرکانس بیشینه نوسانی و بهره نویز مینیمم در مقایسه با ساختار متداول بهبود قابل ملاحظه ای یافته است. همچنین ملاحظات طراحی لایه بافر و نقش پارامترهای آن بر روی عملکرد الکتریکی افزاره پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است. ساختارهای مورد مطالعه در این مقاله توسط نرم افزار SILVACO که از مدل های فیزیکی مقاوم و دقیقی برای آنالیز افزاره های نیمه هادی برخوردار است، شبیه سازی شده و نتایج ارائه شده در مقاله حاضر همگی برتری عملکرد ساختار پیشنهادی را نشان می دهند.

کلیدواژه: اکسید مدفون، افزاره بدون پیوند، سیلیسیم روی عایق، لایه بافر.

۱- مقدمه

امروزه با رشد چشم گیر فناوری و نیاز ضروری بشر و ماشین آلات به کارایی و سرعت بالا در تبادل داده ها، تحقیقات زیادی بر روی افزاره ها^۱ برای نیل به این هدف مهم انجام می شود. نیاز به سرعت بالا منجر به کوچک کردن اندازه افزاره ها می گردد که این عمل در نهایت منجر به بروز اثرات نامطلوبی نظیر اثرات کانال کوتاه^۲ و آثار حامل های داغ^۳ شده که بسیار نامطلوب است. بدین منظور افزاره های مبتنی بر فناوری سیلیسیم روی عایق^۴ به عنوان یک راه حل مؤثر پیشنهاد شده اند. وجود اکسید

این مقاله در تاریخ ۲ آبان ماه ۱۳۹۹ دریافت و در تاریخ ۱۰ فروردین ماه ۱۴۰۰ بازنگری شد.

محمد کاظم انوری فرد (نویسنده مسئول)، دانشکده فنی و مهندسی شرق گیلان، دانشگاه گیلان، ایران، (email: m.anvarifard@guilan.ac.ir).

1. Transistors
2. Short Channel Effects
3. Hot Carrier Effects
4. Silicon-on-Insulator

5. Buried Oxide
6. Gate
7. Junctionless
8. Source
9. Drain
10. SOI-Junctionless

جدول ۱: پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی ساختار پیشنهادی.

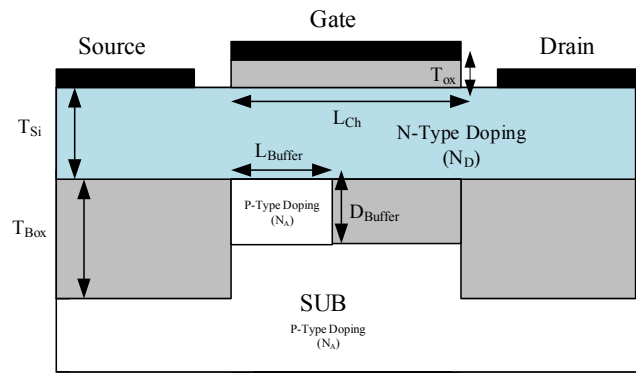
مقدار تغییرات	متغیر
۲۲ نانومتر	طول کانال، L_{Ch}
۱ نانومتر	ضخامت اکسید گیت، T_{ox}
۱۰ نانومتر	ضخامت ناحیه کانال، T_{Si}
۶۰ نانومتر	ضخامت اکسید مدفون، T_{Box}
۱۱ نانومتر	طول لایه بافر، L_{Buffer}
۳۰ نانومتر	عمق لایه بافر، D_{Buffer}
1×10^{19} بر سانتی‌متر مکعب	آلایش کانال، N_D
5×10^{18} بر سانتی‌متر مکعب	آلایش لایه بافر، N_A
۵/۱ الکترون ولت	تابع کار الکتروگیت

نشان می‌دهد. با نگاهی به این دو ساختار می‌توان پی به تغییرات ساختار پیشنهادی برد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، اکسید مدفون در ساختار پیشنهادی به نصف کاهش یافته و همچنین بخشی از آن که زیر کانال نزدیک ناحیه منبع است با یک لایه بافر با آلایش P جایگزین می‌گردد. این لایه با ایجاد یک ناحیه تخلیه اضافی، نقش بسیار مهمی در کاهش جریان نشتی ساختار پیشنهادی ایفا می‌کند. در حقیقت این لایه باعث اصلاح نوار انرژی از طریق موازنه بار می‌گردد و با ایجاد سدی از حرکت حامل‌ها در زیرآستانه جلوگیری می‌کند. همچنین از آنجایی که ضخامت اکسید مدفون کاهش یافته است، رسانش حرارتی مؤثر افزاره پیشنهادی زیاد شده و در نتیجه دمای شبکه بحرانی کاهش می‌یابد. لایه بافر تعبیه‌شده با دو مشخصه مهم طول بافر L_{Buffer} و عمق بافر D_{Buffer} توصیف می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که غلظت ناخالصی و طول بافر، نقش بسزایی بر روی عملکرد افزاره پیشنهادی ایفا می‌کند که در بخش‌های پایانی این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۱ لیست مقادیر اسمی پارامترهای مهم ساختار پیشنهادی که برای شبیه‌سازی استفاده شده است، ارائه می‌گردد. مقادیر نوعی پارامترها طبق [۱۷] تا [۲۰] انتخاب شده‌اند و همچنین آلایش لایه بافر برابر با آلایش بستر فرض شده است. در ساختار متداول مربوط به مقاله، بخش فعال افزاره بر روی اکسید مدفون ساخته می‌شود. سایر اجزای افزاره مثل الکترودها، نواحی آلایش‌شده و ... مطابق با مراجع و همچنین نقشه راه فناوری افزاره‌های نیمه‌هادی انتخاب شده است [۱۷] تا [۲۰]. همچنین از آنجایی که مقایسه بین ساختار پیشنهادی و متداول انجام می‌شود، هر دوی آنها در یک طول گیت برابر شبیه‌سازی می‌شوند تا نتایج گرفته‌شده اعتبار داشته باشد. ذکر این نکته ضروری است که تمامی پارامترهای ساختار پیشنهادی برابر با پارامترهای ساختار متداول است مگر خلاف آن در مقاله ذکر شود.

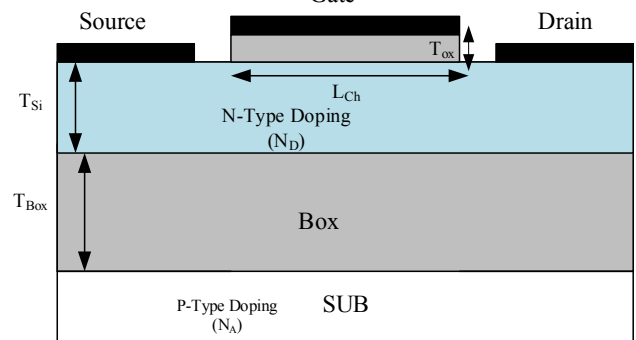
۳- معادلات حاکم بر ترابرد ساختار پیشنهادی و روند شبیه‌سازی

برای بررسی ترابرد حامل‌ها در ساختارهای مورد مطالعه در این مقاله، معادله موازنه انرژی همراه با معادلات پیوستگی جریان به طور هم‌زمان حل می‌گردد. همچنین برای شامل کردن اثر الکترواستاتیک دروازه بر روی کانال، معادله پواسن حل شده که با معادلات ترابرد حامل‌ها کوپل می‌گردد. در ادامه معادلات مهمی که برای شبیه‌سازی عددی ساختار پیشنهادی استفاده شده است، آورده می‌شود [۲۱] تا [۲۴]

$$\text{div}(\epsilon \nabla \psi) = -(N_D + P - N_A - n) \quad (1)$$



(الف)



(ب)

شکل ۱: نمایی از سطح مقطع ساختارهای (الف) پیشنهادی و (ب) متداول که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است.

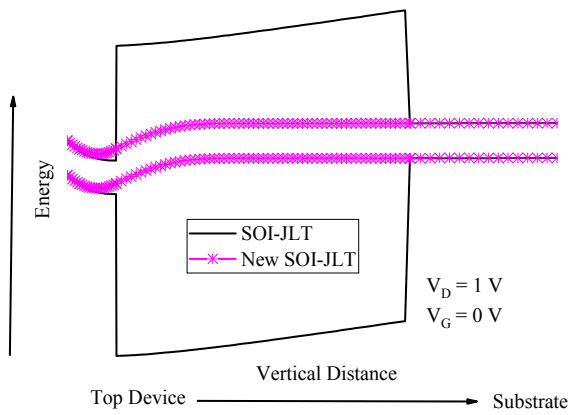
به زیر ۴ نانومتر می‌باشد که با توجه به محدودیت فناوری، تحقق آن بسیار چالش‌برانگیز است [۱۶].

در این مقاله ساختار افزاره اثر میدان بدون پیوند مبتنی بر سیلیسیم روی عایق به طور هدفمند تغییر داده شده تا بدون آن که محدودیت فناوری خللی در پیاده‌سازی آن ایجاد نماید، عملکرد الکتریکی و حرارتی آن بهبود یابد. برای رسیدن به این هدف مهم، اکسید مدفون زیر کانال به نصف تقلیل یافته و همچنین بخشی از آن که زیر کانال و نزدیک ناحیه منبع است با لایه بافر نوع P جایگزین شده است. افزایش رسانش حرارتی و همچنین ایجاد ناحیه تخلیه اضافی در مرز کانال پایینی با لایه بافر، دو عامل بسیار مهم و کلیدی در بهبود پارامترهای مهم افزاره بدون پیوند پیشنهادی هستند.

کار حاضر برای تشریح عملکرد هر چه بهتر ساختار پیشنهادی، در ۶ بخش تدوین شده است. بخش اول که در حال مطالعه آن هستیم پیش‌زمینه‌ای از افزاره‌های اثر میدان بدون پیوندی است. بخش دوم معماری ساختار پیشنهادی و مقادیر اسمی پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی را ارائه می‌کند. معادلات فیزیکی حاکم بر رفتار ساختارها و همچنین روش شبیه‌سازی ساختارهای مورد مطالعه در بخش بعد آن بیان شده است. بخش ۴ نتایج جامعی از شبیه‌سازی ساختار پیشنهادی و مقایسه با ساختار متداول را در شرایط DC و AC ارائه می‌کند. ملاحظات طراحی لایه بافر و اثر پارامترهای آن بر روی عملکرد الکتریکی ساختار پیشنهادی در بخش ۵ به تفصیل شرح داده شده است. پس از تبیین کامل ساختار پیشنهادی، مقاله در بخش پایانی جمع‌بندی و خاتمه می‌یابد.

۲- معماری ساختار پیشنهادی

شکل ۱ نمایی از افزاره بدون پیوند مبتنی بر سیلیسیم روی عایق پیشنهادی و متداول را که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است،



شکل ۲: پروفایل انرژی نوار رسانش و ظرفیت در جهت کانال عمودی.

هر دو ساختار پیشنهادی و متداول در شکل ۲ نشان داده شده است. ولتاژ چاه برابر با ۱ ولت و ولتاژ دروازه برابر با صفر ولت فرض شده تا جریان خاموش افزاره‌ها به درستی ارزیابی گردد. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، انرژی رسانش ساختار پیشنهادی در انتهای کانال بالاتر از آن در ساختار متداول است که نشان‌دهنده گسترش ناحیه تخلیه در مرز لایه بافر و ناحیه پایینی کانال است. زیرا در ناحیه تخلیه ایجاد شده، موازنه بار الکتریکی رخ داده و میدان الکتریکی افزایش می‌یابد. از آنجایی که میدان الکتریکی متناسب با تغییرات انرژی رسانش بوده است، باعث می‌شود انرژی رسانش افزایش یابد. در حقیقت اختلاف انرژی فرمی E_F بستر از انرژی رسانش کانال پایینی E_C در ساختار پیشنهادی به مراتب بالاتر از آن در ساختار متداول است که به توجه به رابطه زیر، چگالی حامل‌ها کم شده و برعکس به مقدار بار یونیزه شده افزوده می‌شود [۲۱]

$$n = N_C F_{77} \frac{E_F - E_C}{KT_L} \quad (۹)$$

بنابراین این بار یونیزه شده، الگوی پتانسیل الکتریکی (نوار انرژی) را تغییر داده و باعث افزایش حجم کانال تخلیه شده می‌گردد. بنابراین در یک شرایط کاری یکسان، ساختار پیشنهادی حجم بار تخلیه بیشتری نسبت به ساختار متداول کسب کرده و باعث کاهش سطح مقطع مؤثر عبور حامل‌ها از سمت منبع به چاه می‌گردد که در نهایت منجر به کاهش قابل ملاحظه در جریان خاموش افزاره پیشنهادی می‌شود.

باید توجه داشت برای آن که افزاره‌های بدون پیوند مبتنی بر سیلیسیم روی عایق، کارایی بالایی داشته باشند نیاز به کاهش ضخامت کانال به زیر ۴ نانومتر داشته تا منجر به تخلیه گسترده کانال گردد که با توجه به محدودیت فناوری ساخت با چالش عظیمی مواجه می‌شویم. بنابراین به ناچار مجبور هستیم که ضخامت کانال، بالای ۱۰ نانومتر تعیین گردد که این کار خود منجر به بروز آثار نامطلوب در عملکرد الکتریکی می‌گردد. اما در ساختار پیشنهادی بدون آن که ضخامت لایه سیلیسیم کوچک سازی گردد، لایه بافر به صورت الکتریکی تخلیه در کانال ایجاد کرده و منجر به بهبود عملکرد افزاره بدون پیوند مبتنی بر سیلیسیم روی عایق می‌گردد. همان طور که می‌دانیم، یکی از ضعف‌های بزرگ افزاره‌های بدون پیوندی، جریان نشتی بالایی آن است که باعث می‌شود نتوان به درستی در کاربردهای دیجیتال از آن بهره برد. برای این که این مشکل حل گردد سراسرترین راه حل کاهش ضخامت کانال به زیر ۴ نانومتر است تا منجر شود ترانزیستور در زیرآستانه به طور کامل تخلیه گردد. با وجود این، فرایند نازک سازی کانال برای دستیابی به ضخامت فوق العاده نازک ۴ نانومتر بسیار سخت بوده و از لحاظ ساخت با چالش‌های فراوانی روبه‌رو

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \text{div}(\vec{J}_n) + G_n - R_n \quad (۲)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \text{div}(\vec{J}_p) + G_p - R_p \quad (۳)$$

$$\vec{J}_n = qD_n \nabla(n) - q\mu_n n \nabla \psi + qnD_n^T \nabla T_n \quad (۴)$$

$$\text{div}(\vec{S}_n) = \frac{1}{q} \vec{J}_n \cdot \vec{F} - M_n - \frac{3}{2} \frac{k\partial(\lambda_n n T_n)}{\partial t} \quad (۵)$$

$$\vec{S}_n = -k_n \nabla T_n - \left(\frac{k\alpha_n}{q}\right) \vec{J}_n T_n \quad (۶)$$

$$\vec{J}_p = -qD_p \nabla p - qp\mu_p \nabla \psi + \mu_p p(kT_L \nabla(Ln n_{ie})) \quad (۷)$$

که در معادلات فوق ψ پتانسیل الکتریکی، J_n چگالی جریان الکترون، J_p چگالی جریان حفره، μ تحرک پذیری حامل‌ها، F میدان الکتریکی، T_n دمای الکترون، G نرخ تولید حامل و R نرخ باز ترکیب حامل‌ها است.

برای آن که اثر حرارتی در ساختار در نظر گرفته شود، معادله حرارتی مطابق رابطه زیر همراه با معادلات فوق حل می‌گردد

$$C \frac{\partial T_L}{\partial t} = \nabla(k \nabla T_L) + H \quad (۸)$$

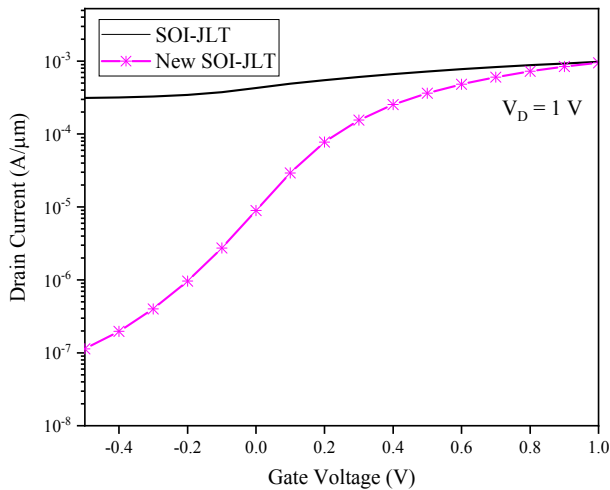
ذکر این نکته ضروری است که همه متغیرها در معادلات بالا در [۲۱] به طور کامل تعریف شده است. برای حل عددی معادلات ذکر شده شبیه ساز ATLAS که بخشی از نرم افزار بزرگ SILVACO می‌باشد استفاده شده است [۲۱]. شرایط مرزی دیریکله و نیومن در ساختارهای مورد مطالعه برای حل معادلات فوق در نظر گرفته می‌شود. کل فضای ساختار پیشنهادی شبکه بندی شده و با گسسته سازی معادلات فوق به روش جعبه محدود، این معادلات در همه گره‌های این شبکه نوشته شده و با روش تکرار نیوتن حل می‌گردد. برای رسیدن به جواب دقیق، مدل‌های فیزیکی مهمی همچون تحرک پذیری وابسته به میدان الکتریکی عرضی، باز ترکیب شاکلی و باریک شدن شکاف انرژی که به میزان آرایش کانال بستگی دارد، فعال شده است. همچنین از آنجایی که میزان آرایش در ساختار، بالا بوده است از استاتیک فرمی به جای بولتزمن برای رسیدن به جواب دقیق تر استفاده می‌شود. همچنین نرم افزار SILVACO به علت تطابق بسیار بالا بین نتایج تجربی و نتایج شبیه سازی شده به طور گسترده استفاده می‌شود که در [۱۷] تا [۲۰] اعتبارسنجی این نرم افزار نشان داده شده است.

۴- نتایج شبیه سازی

در این بخش نتایج شبیه سازی ساختارهای مورد مطالعه در این مقاله برای مقایسه عملکرد الکتریکی و حرارتی افزاره بدون پیوند پیشنهادی ارائه می‌شود. هر دو تحلیل حالت ماندگار و AC برای ساختارها انجام شده است. ذکر این نکته ضروری است که ولتاژ ترمینال‌ها و فرکانس ورودی در هر نموداری که مورد بررسی قرار می‌گیرد مشخص گردیده است.

۴-۱ تحلیل حالت ماندگار

منحنی نوار انرژی در امتداد کانال عمودی (بالا به پایین افزاره)، برای

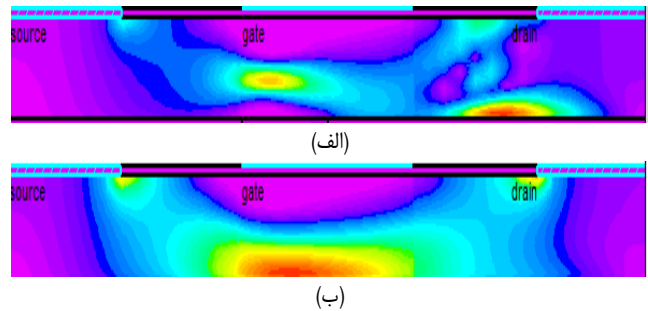


شکل ۴: جریان چاه بر حسب ولتاژ دروازه.

در اکسید مدفون، رسانش حرارتی مؤثر ساختار پیشنهادی افزایش یافته که باعث شده دمای بحرانی شبکه کاهش یابد که خود منجر به افزایش تحرک پذیری حامل‌ها شده و به نوعی جریان را افزایش می‌دهد. از آنجایی که این دو عامل در خلاف همدیگر بر روی ساختار پیشنهادی اثر می‌گذارند، باعث می‌گردد ساختار جدید تغییرات بسیار اندکی در جریان روشنایی خود داشته باشد.

جدول ۲ به طور خلاصه لیست مهمی از پارامترهایی نظیر جریان روشنایی، جریان خاموش، رسانایی انتقالی، بهره ولتاژ و نسبت جریان روشنایی به خاموش را نشان می‌دهد که همه این پارامترهای مهم برای ساختار پیشنهادی بهبود یافته‌اند. همان طور که در جدول مشاهده می‌شود، ساختار مرسوم، نسبت جریان روشنایی به خاموش بسیار پایینی داشته که قابل استفاده در کاربردهای ولتاژ پایین نیست. برای این که بتوان از ساختار متداول در این کاربردها استفاده کرد، نیاز به این داشته تا ضخامت کانال سیلیسیم به زیر ۴ نانومتر کوچک‌سازی گردد که به خاطر چالش‌های عظیمی که در فناوری ساخت وجود دارد، این کار به هیچ وجه توصیه نمی‌شود. در نقطه مقابل ساختار پیشنهادی با ضخامت کانال برابر با ۱۰ نانومتر توانسته است جریان روشنایی به خاموش بالایی تولید کند که بسیار مطلوب است.

یکی دیگر از مشخصات بسیار مهمی که در افزاره‌های بدون پیوند مبتنی بر سیلیسیم روی عایق مطرح است، مسأله خودگرمایی است. از آنجایی که اکسید مدفون به عنوان یک ایزولاسیون بین کانال و بستر در این افزاره‌ها استفاده می‌شود، رسانش حرارتی مؤثر افزاره کاهش یافته و حرارت نمی‌تواند به راحتی با محیط تبادل داشته باشد و در نتیجه دمای شبکه افزایش می‌یابد که می‌تواند منجر به تنزل عملکرد الکتریکی افزاره‌های بدون پیوندی گردد. شکل ۵ دمای شبکه را در همه نقاط شبکه ساختارهای پیشنهادی و متداول نشان می‌دهد. شرایط کاری $V_G = V_D$ برابر با ۱ ولت فرض شده است. با توجه به شکل دیده می‌شود که دمای شبکه در کانال افزاره بدون پیوند متداول بسیار بالا رفته است، به طوری که به بالای ۵۰۰ درجه کلونین می‌رسد. این در حالی است که دمای شبکه در ساختار پیشنهادی فقط کمی بالاتر (در حدود ۱۵ درجه کلونین) از دمای محیط که برابر با ۳۰۰ درجه کلونین فرض شده است، می‌رسد که نشان‌دهنده بهبود عملکرد حرارتی ساختار پیشنهادی در مقایسه با ساختار متداول است. دلیل کاهش دمای شبکه با استفاده از (۱۰) که یک عبارت تحلیلی برای مقاومت حرارتی ساختارهای مبتنی بر فناوری سیلیسیم روی عایق را نشان می‌دهد، بیان می‌گردد [۲۱]



شکل ۳: کانتور جریان دوبعدی برای ساختارهای (الف) پیشنهادی و (ب) متداول.

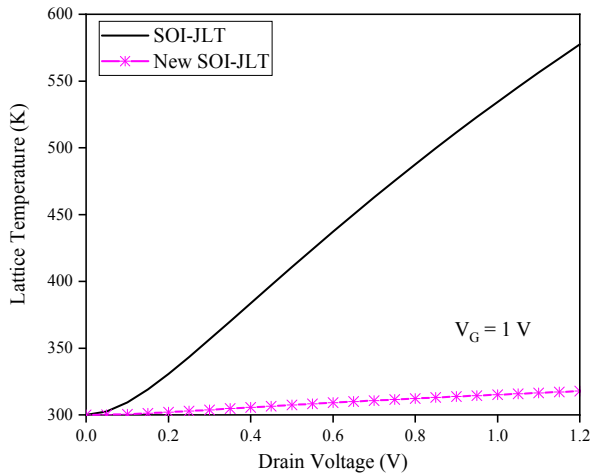
جدول ۲: بهبود پارامترهای مهم در ساختار پیشنهادی.

پارامتر	ساختار پیشنهادی	ساختار متداول
جریان روشنایی	9.5×10^{-4} آمپر	9.7×10^{-4} آمپر
جریان خاموش	1.3×10^{-7} آمپر	8.2×10^{-8} آمپر
نسبت جریان روشنایی به خاموش	8.4×10^{-3}	۱۲
رسانایی انتقالی	۱ میلی‌زیمنس	۰.۳۹ میلی‌زیمنس
بهره ولتاژ	۳.۸	۲.۳

است [۱۶]. همچنین در ضخامت کانال زیر ۶ نانومتر اثرات کوانتومی پدیدار شده که باعث می‌گردد تا شیب زیرآستانه افزایش یابد [۱۷] تا [۲۰]. بنابراین سعی می‌شود ضخامت کانال در محدوده ۱۰ نانومتر ثابت نگه داشته شود و با تغییرات در ساختار افزاره، مشخصات الکتریکی آن بهبود داده شود.

برای درک بهتر، کانتور جریان دوبعدی برای ساختار پیشنهادی و متداول در شکل ۳ نمایش داده شده است. ساختارها در شرایط کاری یکسان ولتاژ دروازه برابر با صفر و ولتاژ چاه برابر با یک ولت شبیه‌سازی شده‌اند. همان طور که دیده می‌شود فقط کانال بالایی افزاره متداول تخلیه شده که منجر به برقراری جریان خاموش بالایی در کانال پایینی افزاره می‌گردد (کانتورهای قرمز رنگ نشان‌دهنده مقدار بیشینه جریان هستند). با وجود این، به علت لایه بافر درج شده در اکسید مدفون ساختار پیشنهادی، یک لایه تخلیه اضافی در کانال پایینی (علاوه بر کانال بالایی) شکل گرفته و باعث می‌شود حجم کانال تخلیه شده بیشتر گردد. یک نتیجه بسیار مهم، کاهش سطح مقطع عبور الکترون‌ها بوده که در نهایت منجر به کاهش جریان خاموش می‌گردد.

منحنی انتقالی در شکل ۴ برای هر دو ساختار پیشنهادی و متداول رسم شده است. این منحنی که وابستگی جریان چاه به ولتاژ دروازه را نشان می‌دهد، در ولتاژ کاری چاه برابر با ۱ ولت به تصویر کشیده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، افزاره پیشنهادی جریان خاموش به مراتب کوچک‌تری در مقایسه با ساختار متداول دارد. همچنین ملاحظه می‌شود که استفاده از تکنیک ارائه شده در مقاله باعث کاهش قابل ملاحظه در شیب زیرآستانه شده که در نهایت باعث افزایش کارایی افزاره بدون پیوند پیشنهادی می‌شود. ممکن است تصور شود که ساختار پیشنهادی در نتیجه کاهش ضخامت مؤثر کانال باعث کاهش جریان روشنایی شده که مطلوب نمی‌باشد. اما میزان کاهش جریان چاه بسیار کم بوده که در مقایسه با افت شدید جریان خاموش، قابل چشم‌پوشی است و یک نتیجه بسیار مهم، افزایش قابل ملاحظه نسبت جریان روشنایی به خاموشی برای ساختار پیشنهادی است. در حقیقت به علت تعبیه لایه بافر



شکل ۶: دمای شبکه بر حسب ولتاژ چاه.

است، در صورتی که مشخصات پویای افزاره‌ها در کاربردهای آنالوگ و دیجیتال فرکانس بالا بسیار حایز اهمیت است. برای تحلیل حوزه فرکانسی ساختارهای مورد مطالعه در این مقاله، ابتدا ترمینال‌های منبع، چاه و دروازه در نقطه کاریشان بایاس شده و سپس یک منبع ولتاژ سیگنال کوچک با فرکانس ۱۰۰ مگاهرتز به ترمینال دروازه اعمال می‌شود. با استخراج ماتریس ادیتمتانس و سپس ماتریس پارامترهای پراکندگی S ، پارامترهای مهم فرکانسی استخراج شده که در ادامه توصیف می‌گردند. همچنین جزئیات بیشتر در مورد چگونگی استخراج پارامترهای فرکانسی با استفاده از ماتریس‌های S در [۲۱] ارائه شده است.

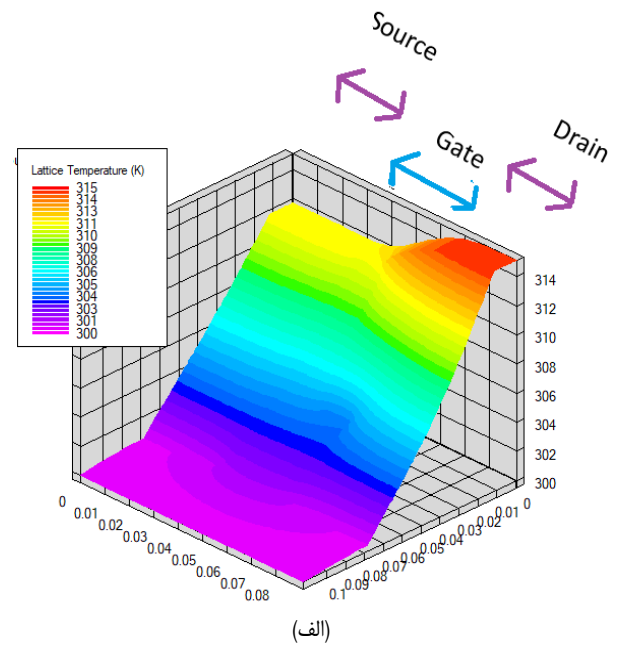
خازن‌های پارازیتی که به عنوان یکی از پارامترهای بسیار مهم و تأثیرگذار بر روی سرعت افزاره‌ها معرفی می‌شوند، بر حسب ولتاژ دروازه در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که مقدار خازن در تمامی شرایط کاری برای ساختار پیشنهادی، کمتر از ساختار متداول است که برتری عملکرد فرکانسی ساختار ارائه شده را نشان می‌دهد. قرارگیری لایه بافر در اکسید مدفون، یک دیود را که در شرایط معکوس بایاس شده است ایجاد می‌کند که آند آن پتانسیل کمتری از کاتد آن دارد. این لایه تخلیه اضافی شکل گرفته به واسطه دیود بایاس معکوس در ساختار پیشنهادی، منجر به ایجاد یک خازن اضافی که سری با خازن لایه کانال تخلیه شده است، می‌گردد و در نتیجه خازن معادل کاهش می‌یابد. همچنین دمای شبکه نیز اثر منفی بر روی خازن‌های پارازیتی می‌گذارد که در ساختار پیشنهادی این اثر به علت کم‌بودن دمای شبکه، تقلیل یافته و منجر به کاهش خازن‌های پارازیتی در مقایسه با ساختار مرسوم می‌گردد.

همچنین مشخصات رادیو فرکانسی افزاره‌ها که با استفاده از بهره‌های توان استخراج می‌شوند، در این ساختارها مورد مقایسه قرار گرفته است. ذکر این نکته ضروری است که معمولاً عملکرد فرکانس بالای افزاره‌ها به کمک بهره‌های توان یک‌طرفه U و بهره جریان h_{r1} توسط ماتریس هیبرید توصیف می‌شود که مقادیر فوق مطابق روابط زیر به دست می‌آیند [۱۸]

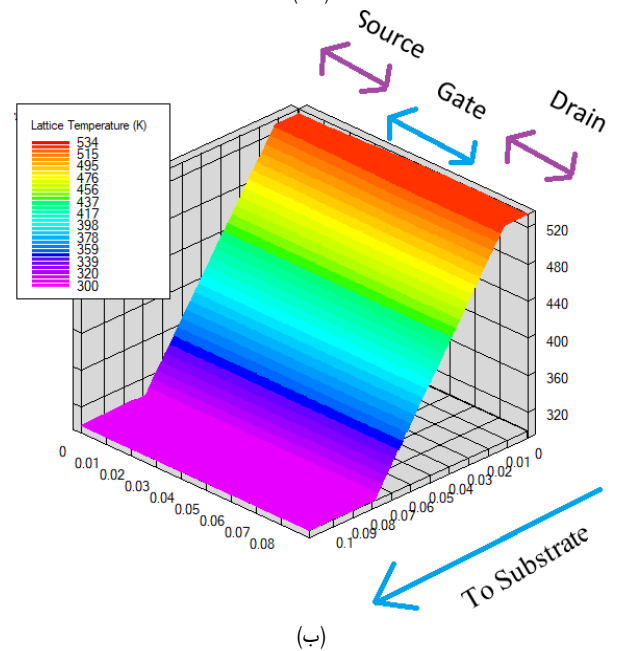
$$U = \frac{|Y_{r1}|^2}{4 \operatorname{Re}(Y_{r1}) \operatorname{Re}(Y_{r2})} \quad (11)$$

$$h_{r1} = 20 \log_{10} |\Delta_\epsilon| \quad (12)$$

$$\Delta_\epsilon = \frac{-2|S_{r1}|^2}{(1-S_{r1})(1+S_{r2}) + S_{r2}S_{r1}}$$



(الف)



(ب)

شکل ۵: توزیع دمای شبکه در سراسر (الف) ساختار پیشنهادی و (ب) ساختار متداول.

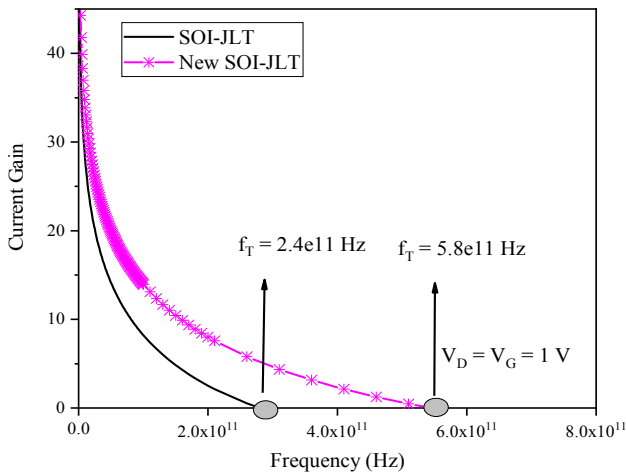
$$R_{th} = \frac{1}{2W} \left(\frac{t_{Box}}{K_{ox} K_d t_{Si}} \right)^2 \quad (10)$$

که در رابطه بالا K_{ox} رسانش حرارتی اکسید مدفون است. از آنجایی که در ساختار پیشنهادی، بخشی از اکسید مدفون با لایه بافر جایگزین شده است رسانش حرارتی مؤثر ساختار زیاد شده و بنابراین، مقاومت حرارتی کاهش می‌یابد که نتیجه آن کاهش دمای شبکه است.

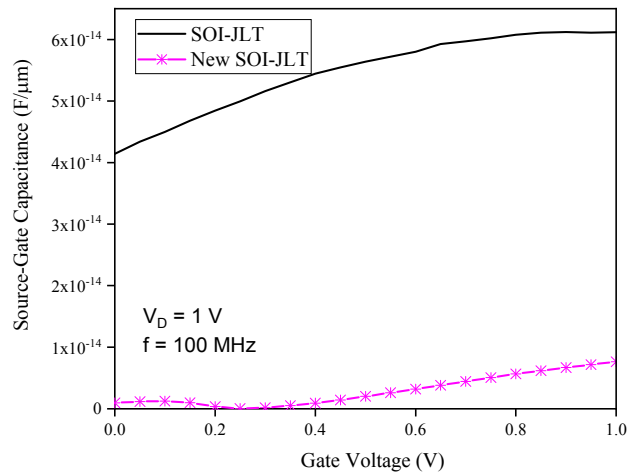
دمای شبکه بر حسب ولتاژ چاه در ولتاژ دروازه V_G برابر با ۱ ولت برای هر دو ساختار تحت بررسی در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که از شکل مشهود است، علاوه بر این که ساختار پیشنهادی دارای دمای شبکه به مراتب کمتری نسبت به ساختار متداول است، شیب منحنی آن نیز بسیار کم بوده که باعث می‌شود بتوان از ساختار پیشنهادی در ولتاژهای کاری بالاتر بدون نگرانی از مشکل خود گرمایی بهره برد.

۴-۲ تحلیل فرکانسی

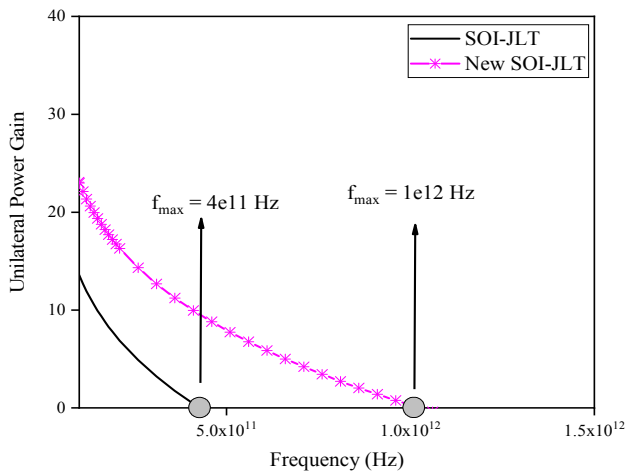
تا کنون، تمرکز فقط روی مشخصات استاتیک ساختار پیشنهادی بوده



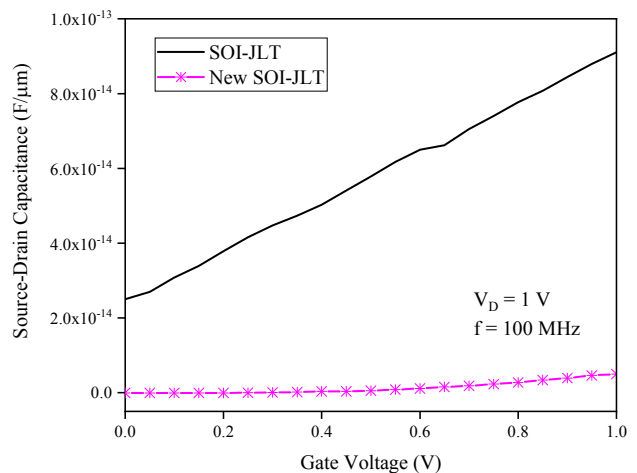
شکل ۱۰: بهره جریان بر حسب فرکانس.



شکل ۷: خازن دروازه-منبع بر حسب ولتاژ دروازه.

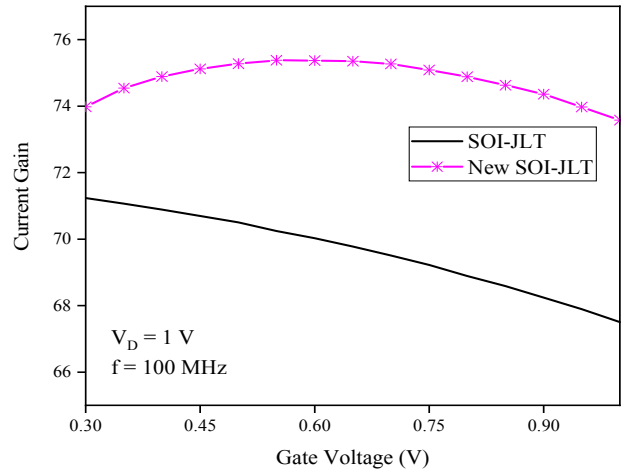


شکل ۱۱: بهره توان یکطرفه بر حسب فرکانس.



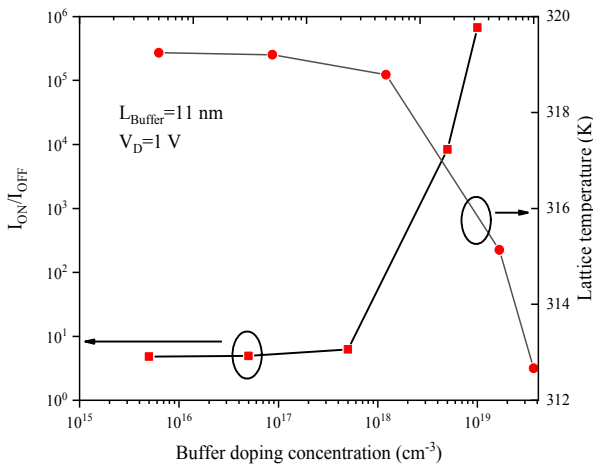
شکل ۸: خازن منبع-چاه بر حسب ولتاژ دروازه.

فرکانس قطع و فرکانس بیشینه نوسانی به عنوان یکی دیگر از پارامترهای مهم در ارزیابی فرکانس بالای افزارها به حساب می‌آید. بدین منظور هر دو بهره‌های توان یکطرفه و بهره جریان بر حسب فرکانس در شرایط کاری $V_G = V_D$ برابر با ۱ ولت برای ساختارهای پیشنهادی و متداول در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ رسم شده است. همان طور که در شکل‌ها دیده می‌شود بهره‌های جریان در فرکانس‌های بالا برای ساختار پیشنهادی بیشتر از ساختار متداول است. یکی از دلایلی که برای این افزایش می‌توان ذکر کرد، افزایش رسانایی انتقالی (مطابق جدول ۲) یعنی Y_{21} و کاهش کندوکنانس چاه یعنی Y_{22} است. از آنجایی که ناحیه تخلیه اضافی در زیر کانال شکل گرفته است، یک مقاومت الکترواستاتیکی بالا تولید شده و افزایش بیشتر ولتاژ چاه بر روی این قسمت از کانال متمرکز شده و در نتیجه مقاومت مؤثر خروجی افزایش یافته که به منزله کاهش کندوکنانس خروجی است. افزایش رسانایی انتقالی و کاهش کندوکنانس خروجی، طبق (۱۱) و (۱۲) به افزایش بهره‌های توان و به نوبه آن فرکانس‌های قطع و بیشینه نوسانی ختم می‌گردد. فرکانس‌های قطع و بیشینه نوسانی به فرکانسی اطلاق می‌گردد که در آن فرکانس به ترتیب، بهره جریان و توان یکطرفه برابر با صفر دسی‌بل گردد. دستیابی به فرکانس قطع 5.8×10^{11} هرتز و فرکانس بیشینه نوسانی 1×10^{12} هرتز برای ساختار پیشنهادی که هر دوی آنها بالاتر از فرکانس‌های ساختار متداول هستند، دستاورد بسیار مهمی در حوزه فرکانس بالا برای افزارهای بدون پیوندی مبتنی بر سیلیسیم روی عایق به حساب می‌آید. در ادامه به صورت تحلیلی، دلیل افزایش فرکانس قطع و بیشینه نوسانی

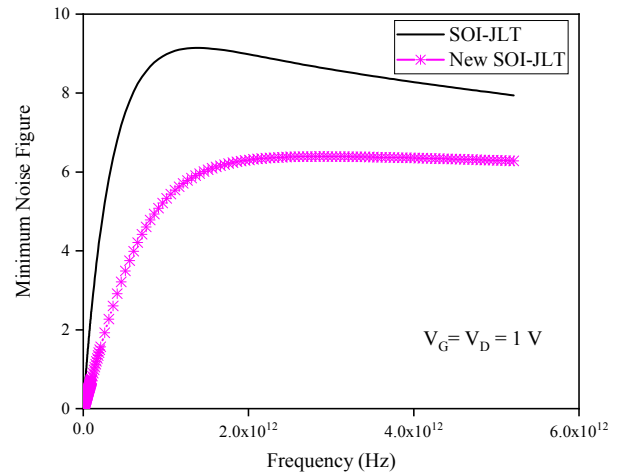


شکل ۹: بهره جریان بر حسب ولتاژ دروازه.

در روابط بالا S و Y به ترتیب پارامترهای ماتریس ادمیتانس و پراکندگی هستند و همچنین $Re(Y_{22})$ کندوکنانس خروجی را نشان می‌دهد. شکل ۹ منحنی بهره جریان (h_{21}) بر حسب ولتاژ دروازه را برای هر دو ساختار پیشنهادی و متداول نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که بهره جریان ساختار پیشنهادی از افزایش برخوردار بوده که بسیار مطلوب است. در حقیقت یکی از دلایل بسیار مهم برای این افزایش، به دمای شبکه بحرانی کاهش یافته در ساختار پیشنهادی برمی‌گردد که منجر شده تا پارامترهای بهره برای افزاره پیشنهادی افزایش یابد.



شکل ۱۴: اثر میزان آرایش لایه بافر بر روی نسبت جریان روشنایی به خاموش و دمای شبکه.



شکل ۱۲: بهره نویز مینیمم بر حسب فرکانس.

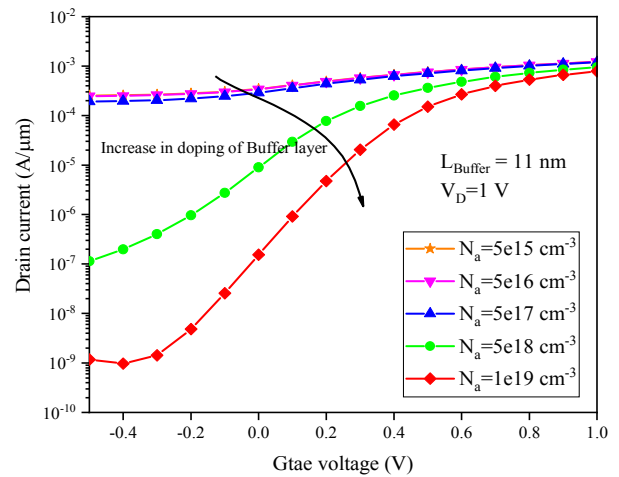
۵- ملاحظات طراحی لایه بافر ساختار پیشنهادی

در این بخش اثر لایه بافر بر روی عملکرد الکتریکی ساختار پیشنهادی بررسی می‌شود. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، لایه بافر با دو مشخصه مهم یکی طول ناحیه بافر و دیگری غلظت ناخالصی آن توصیف می‌شود. هر دوی این مشخصه‌ها، نقش تعیین کننده‌ای در مدولاسیون کانال ایفا کرده و به طور جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرند. در ابتدا به بررسی اثر غلظت ناخالصی لایه بافر می‌پردازیم. بنابراین طول لایه بافر برابر با مقدار اسمی آن یعنی ۱۱ نانومتر فرض می‌شود و طیف‌های مهمی از پارامترهای مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

شکل ۱۳ متحنی جریان‌های چاه را بر حسب ولتاژ دروازه برای حالت‌های مختلف آرایش لایه بافر ساختار پیشنهادی نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود آرایش بسیار پایین لایه بافر باعث تنزل عملکرد ساختار پیشنهادی می‌گردد، زیرا در آرایش پایین بیشتر ناحیه تخلیه در داخل لایه بافر گسترش می‌یابد و در نتیجه کانال تخلیه نشده و جریان خاموش زیاد می‌گردد. اما با افزایش غلظت ناخالصی، ناحیه تخلیه در دو بخش لایه بافر و ناحیه کانال گسترش یافته و در نتیجه کاهش جریان نشستی، کاهش شیب زیرآستانه و همچنین افزایش جریان روشنایی به خاموش را به دنبال دارد.

برای بررسی بهتر، نسبت جریان روشنایی به خاموش و دمای شبکه بحرانی برای غلظت‌های ناخالصی مختلف لایه بافر در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود با افزایش آرایش لایه بافر، نسبت جریان روشنایی به خاموش افزایش یافته که نرخ این افزایش برای غلظت ناخالصی بزرگ‌تر از 5×10^{18} بر سانتی‌متر مکعب، بالاتر است. همچنین دمای شبکه با افزایش آرایش لایه بافر کاهش می‌یابد که در نتیجه کاهش جریان اشباع است. ملاحظه می‌شود که افزایش بیش از حد غلظت ناخالصی لایه بافر می‌تواند منجر به تنزل جریان چاه گردد که در شکل برای غلظت ناخالصی 1×10^{19} بر سانتی‌متر مکعب به وضوح دیده می‌شود.

برای بررسی نقش ناخالصی لایه بافر بر روی مشخصات فرکانسی، فرکانس‌های قطع و بیشینه نوسانی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند که در شکل ۱۵ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش غلظت ناخالصی لایه بافر، هر دوی فرکانس‌های قطع و بیشینه نوسانی افزایش یافته که میزان افزایش برای غلظت ناخالصی بزرگ‌تر از 5×10^{18} بر سانتی‌متر مکعب بسیار بیشتر است.



شکل ۱۳: جریان چاه بر حسب ولتاژ دروازه برای آرایش‌های مختلف لایه بافر.

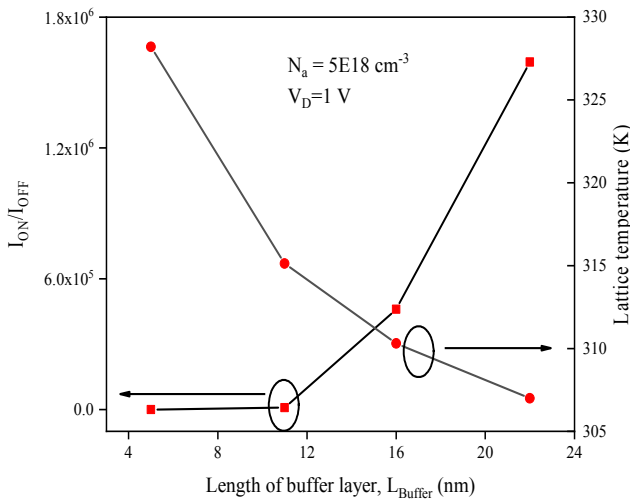
مشخص می‌گردد. همان طور که می‌دانیم برای فرکانس قطع و بیشینه نوسانی رابطه تحلیلی زیر قابل ارائه است [۲۵]

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})} \quad (13)$$

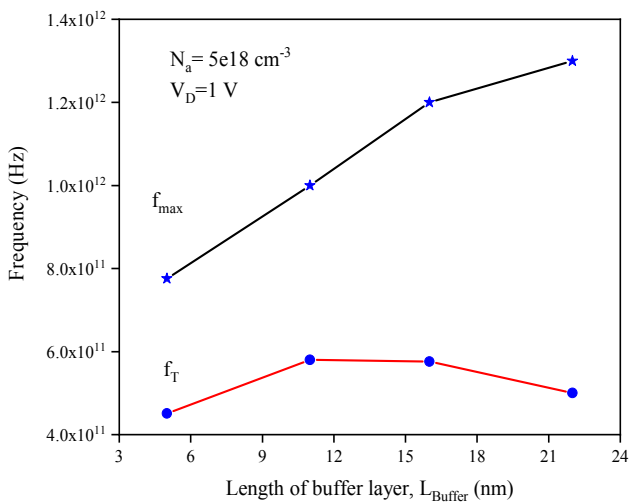
$$f_{max} = \frac{f_T}{2} \sqrt{\frac{R_{DS}}{R_G}} \quad (14)$$

بر طبق روابط فوق به علت افزایش رسانایی انتقالی و کاهش خازن دروازه-منبع، فرکانس قطع و به نوبه آن فرکانس بیشینه نوسانی ساختار پیشنهادی در مقایسه با ساختار متداول بهبود پیدا کرده است.

یکی دیگر از پارامترهای بسیار مهم که معمولاً در فرکانس‌های بالا تأثیرگذار است، نویز می‌باشد. برای آن که میزان اثرپذیری نویز بر روی ساختارها اندازه‌گیری شود، پارامتر بهره نویز مینیمم استخراج می‌گردد. شکل ۱۲ پارامتر بهره نویز مینیمم بر حسب فرکانس را برای هر دو ساختار تحت بررسی در این مقاله نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که مقدار نویز در ساختار بدون پیوندی پیشنهادی با لایه بافر و اکسید مدفون پیشنهادی کمتر از ساختار متداول است که نویدبخش افزاره با کارایی بالا در هر دو حوزه حالت ماندگار و پویا است. یکی از مهم‌ترین دلایلی که می‌توان برای این بهبود بیان کرد، کاهش قابل ملاحظه دمای بحرانی شبکه است که ارتباط تنگاتنگی با نویز دارد. از آنجایی که دمای شبکه در ساختار پیشنهادی کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است، در نتیجه بهره نویز مینیمم کاهش می‌یابد که بسیار مطلوب است.

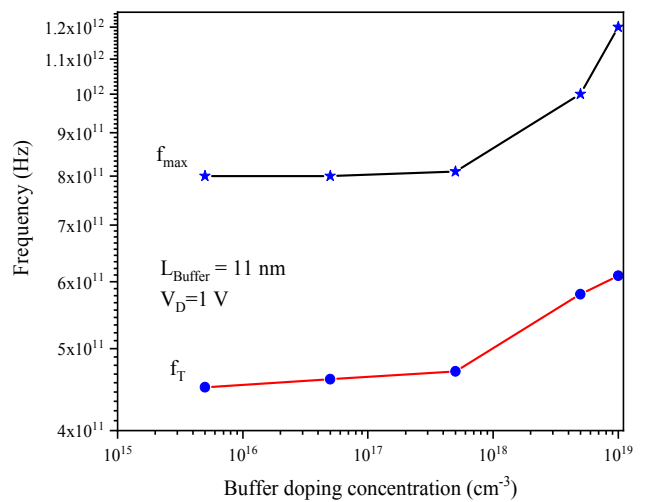


شکل ۱۷: اثر طول لایه بافر بر روی نسبت جریان روشنایی به خاموش و دمای شبکه.

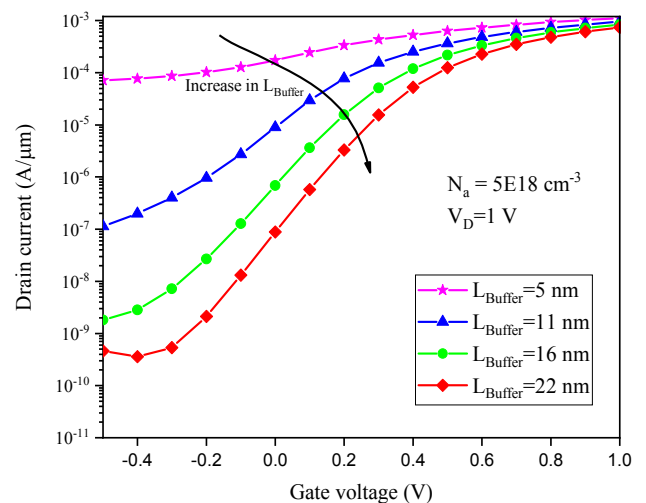


شکل ۱۸: اثر طول لایه بافر بر فرکانس‌های قطع و بیشینه نوسانی.

برای این که به بررسی اثر طول لایه بافر بر روی مشخصات فرکانس بالای ساختار پیشنهادی بپردازیم، شکل ۱۸ تأثیر طول لایه بافر را بر روی فرکانس‌های قطع و بیشینه نوسانی نشان می‌دهد. با افزایش طول لایه بافر، حجم ناحیه تخلیه در کانال بیشتر شده و رسانایی انتقالی افزایش و همچنین خازن دروازه- منبع کاهش می‌یابد که در نتیجه فرکانس قطع و همچنین بیشینه نوسانی افزایش می‌یابد. اما با افزایش بیشتر طول ناحیه بافر، روند معکوس برای فرکانس قطع اتفاق می‌افتد و برای توجیه این روند باید به تشکیل خازن مجزا در دو طرف منبع و چاه توجه کرد. برای طول‌های کوچک لایه بافر، ناحیه تخلیه ایجاد شده در کانال منجر به تشکیل خازن شده که مشابه خازن بایاس معکوس یک دیود است که به سمت منبع متمایل است. کانال در حکم کاتد و لایه بافر در حکم آند است. از آنجایی که ولتاژ دروازه بزرگ‌تر از صفر است، دیود مدل‌سازی شده به نوعی در بایاس معکوس قرار می‌گیرد و در نتیجه خازنی شکل خواهد گرفت که با خازن ناحیه کانال سری شده و در نتیجه خازن معادل دروازه- منبع کاهش می‌یابد که مطابق با (۱۳) افزایش فرکانس قطع و بیشینه نوسانی را به دنبال خواهد داشت. با وجود این، با افزایش بیشتر طول لایه بافر، این دیود مدل‌سازی شده در سمت چاه هم خودنمایی کرده و با توجه به این که بایاس چاه مثبت بوده است، دیگر نمی‌توان ادعا کرد که دیود مدل‌سازی شده در ناحیه معکوس است، زیرا میدان الکتریکی به علت اثرات کانال کوتاه می‌تواند بر الکترواستاتیک لایه بافر تأثیر



شکل ۱۵: اثر میزان آلودگی لایه بافر بر فرکانس‌های قطع و بیشینه نوسانی.



شکل ۱۶: جریان چاه بر حسب ولتاژ دروازه برای طول‌های مختلف لایه بافر.

همچنین طول لایه بافر نیز نقش مهمی بر روی عملکرد افزاره پیشنهادی دارد. برای بررسی نقش طول لایه بافر، مقدار ناخالصی لایه بافر برابر با مقدار اسمی آن یعنی 5×10^{18} بر سانتی‌متر مکعب فرض شده است. منحنی جریان چاه بر حسب ولتاژ دروازه برای طول‌های مختلف لایه بافر در شکل ۱۶ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود با افزایش طول لایه بافر، جریان خاموش و شیب زیرآستانه کاهش می‌کند. همچنین نسبت جریان روشنایی به خاموش افزایش پیدا می‌کند. در حقیقت افزایش طول لایه بافر باعث افزایش حجم تخلیه در کانال شده و در نتیجه باعث بهبود شیب زیرآستانه و جریان خاموش می‌گردد. با وجود این، افزایش بیش از اندازه آن باعث شده تا سطح مقطع مؤثر کانال کاهش چشم‌گیری پیدا کند که در نتیجه جریان چاه در ناحیه اشباع تنزل خواهد کرد.

در شکل ۱۷ نسبت جریان روشنایی به خاموش و دمای شبکه بحرانی نشان داده شده است. بر طبق شکل مشاهده می‌شود که نسبت جریان روشنایی به خاموش و دمای شبکه با افزایش طول لایه بافر به ترتیب زیاد و کم می‌شود. واضح است که افزایش طول لایه بافر، باعث افزایش حجم تخلیه در کانال شده و جریان خاموش را به مقدار قابل توجهی کاهش داده که در نهایت این نسبت زیاد می‌گردد. با وجود این، افزایش طول لایه بافر باعث شده تا مقاومت حرارتی مؤثر ساختار کمتر گردد و در نتیجه دمای شبکه کاهش یابد.

- [۵] س. کلانتری و م. وادی زاده، "کاهش جریان خاموشی در ترانزیستور اثر میدان بدون پیوند دوگیتی نانومتری با استفاده از مهندسی آرایش میانه کانال،" *نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، الف- مهندسی برق،* جلد ۱۶، شماره ۱، صص. ۴۲-۴۷، بهار ۱۳۹۷.
- [۶] م. وادی زاده، س. ص. قریشی و م. فلاح نژاد، "استفاده از گیت کمکی برای بهبود مشخصات الکتریکی ترانزیستور اثر میدان بدون پیوند سیلیکون بر روی عایق،" *نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، الف- مهندسی برق،* جلد ۱۸، شماره ۱، صص. ۶۷-۷۲، بهار ۱۳۹۹.
- [۷] س. م. رضوی، س. ح. ظهیری و س. ا. حسینی، "بررسی مشخصه های الکتریکی AlGaIn/GaN-HEMT با وارد کردن لایه P در لایه سد در دو سمت سورس و درین،" *نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، الف- مهندسی برق،* جلد ۱۵، شماره ۳، صص. ۲۲۲-۲۱۷، پاییز ۱۳۹۶.
- [8] Z. Ramezani and A. A. Orouji, "Investigation of vertical graded channel doping in nanoscale fully-depleted SOI-MOSFET," *Superlattices and Microstructures*, vol. 98, pp. 359-370, Oct. 2016.
- [9] M. Rahimian and A. A. Orouji, "Investigation of the electrical and thermal performance of SOI MOSFETs with modified channel engineering," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 16, no. 5, pp. 1248-1256, Oct. 2013.
- [10] J. P. Colinge, et al., "Junctionless nanowire transistor (JNT): properties and design guidelines," *Solid-State Electronics*, vol. 65/66, pp. 33-37, Nov./Dec. 2011.
- [11] R. K. Baruah and R. P. Paily, "A dual-material gate junctionless transistor with high-k spacer for enhanced analog performance," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 61, no. 1, pp. 123-128, Jan. 2014.
- [12] X. Jin, M. Wu, X. Liu, R. Chuai, H. I. Kwon, J. H. Lee, and J. H. Lee, "A novel high performance junctionless FETs with saddle-gate," *J. of Computational Electronics*, vol. 14, no. 3, pp. 661-668, May 2015.
- [13] C. W. Lee, I. Ferain, A. Afzalian, R. Yan, N. Dehdashti Akhavan, P. Razavi, and J. P. Colinge, "Performance estimation of junctionless multigate transistors," *Solid-State Electronics*, vol. 54, no. 2, pp. 97-103, Feb. 2010.
- [14] Y. Song, et al., "III-V junctionless gate-all-around nanowire MOSFETs for high linearity low power applications," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 35, no. 3, pp. 324-326, Mar. 2014.
- [15] S. Min Lee, H. Jun Jang, and J. T. Park, "Impact of back gate biases on hot carrier effects in multiple gate junctionless transistors," *Microelectronics Reliability*, vol. 53, no. 9-11, pp. 1329-1332, Nov. 2013.
- [16] J. P. Colinge, C. W. Lee, A. Afzalian, N. D. Akhavan, R. Yan, I. Ferain, P. Razavi, B. O'Neill, A. Blake, M. White, A. M. Kelleher, B. McCarthy, and R. Murphy, "Nanowire transistors without junctions," *Nature Nanotechnology*, vol. 5, no. 3, pp. 225-229, Mar. 2010.
- [17] S. Gundapaneni, S. Ganguly, and A. Kottantharayil, "Bulk planar junctionless transistor (BPJLT): an attractive device alternative for scaling," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 32, no. 3, pp. 261-263, Mar. 2011.
- [18] R. Yan, A. Kranti, I. Ferain, C. W. Lee, R. Yu, N. Dehdashti, P. Razavi, and J. P. Colinge, "Investigation of high-performance sub-50 nm junctionless nanowire transistors," *Microelectronics Reliability*, vol. 51, no. 7, pp. 1166-1171, Jul. 2011.
- [19] M. Rahimian and M. Fathipour, "Improvement of electrical performance in junctionless nanowire TFET using hetero-gate-dielectric," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 63, pp. 142-152, Jun. 2017.
- [20] M. Rahimian and M. Fathipour, "Junctionless nanowire TFET with built-in N-P-N bipolar action: physics and operational principle," *J. of Applied Physics*, vol. 120, Article No.: 225702, 2016.
- [21] SILVACO International, *ATLAS User's Manual: 2-D Device Simulator*, Santa Clara, CA, USA, 2016.
- [22] W. B. Joyce and R. W. Dixon, "Analytic approximation for the fermi energy of an ideal fermi gas," *Appl. Phys Lett*, vol. 31, no. 5, pp. 354-356, 1978.
- [23] S. Selberherr, *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices*, Wien, New York: Springer-Verlag, 1984.
- [24] Z. Yu and R. W. Dutton, *SEDAN III-A Generalized Electronic Material Device Analysis Program*, Stanford Electronics Laboratory Technical Report, Stanford University, Jul. 1985.
- [25] M. K. Anvarifard and A. A. Orouji, "Evidence for enhanced reliability in a novel nanoscale partially-depleted SOI MOSFET,"

گذاشته و منجر به افزایش خازن دروازه- چاه گردد. بنابراین افزایش بیشتر در طول لایه بافر ضمن کاهش نرخ تغییرات خازن دروازه- منبع باعث افزایش خازن- دروازه- چاه شده و در نتیجه مطابق با (۱۳) فرکانس قطع روند نزولی را طی خواهد کرد که در شکل مشاهده می شود. همچنین با افزایش بیشتر در طول لایه بافر، مقاومت ناحیه منبع- چاه به علت افزایش حجم مؤثر تخلیه بیشتر شده و در نتیجه فرکانس بیشینه نوسانی که مطابق (۱۴) وابستگی مستقیم به آن دارد، زیاد می گردد که در نتیجه آن، فرکانس بیشینه نوسانی روند صعودی خود را حفظ می کند که به وضوح در شکل مشاهده می شود.

علی رغم برتری به دست آمده برای ساختار پیشنهادی باید توجه کرد که ساخت افزاره به مراحل بیشتری در مقایسه با ساختار متداول نیاز دارد. با توجه به تغییرات ایجاد شده در ساختار پیشنهادی، یک مرحله اضافی نقش نگاری نوری نیاز بوده تا لایه بافر در داخل اکسید مدفون ایجاد گردد. پس از عمل زدایش، سیلیسیم رسوب داده شده و با استفاده از کاشت یون آلیاژ می گردد و در نتیجه لایه بافر شکل می گیرد. بنابراین با چالش خاصی در زمینه ساخت ترانزیستور پیشنهادی مواجه نیستیم مگر آن که تعداد مراحل ساخت اندکی بیشتر از افزاره متداول گردد.

۶- نتیجه گیری

ایجاد یک لایه تخلیه اضافی در کانال افزاره بدون پیوند مبتنی بر سیلیسیم روی عایق به عنوان یک ایده کارساز برای کاهش جریان نشتی در این کار حاضر معرفی شده است. کاهش ضخامت اکسید مدفون و جایگزینی بخشی از آن که زیر کانال و نزدیک سورس بوده با لایه بافر با آرایش P موجب شده تا منحنی نوار انرژی اصلاح شده و بنابراین سد پتانسیل افزایش یافته و در نتیجه جریان خاموش به مقدار قابل توجهی کاهش یابد. افزایش رسانش حرارتی مؤثر و حجم کانال تخلیه شده در ساختار پیشنهادی عوامل کلیدی و تأثیرگذار بر عملکرد حالت ماندگار و فرکانس بالای افزاره هستند. طیف گسترده ای از پارامترهایی نظیر جریان نشتی، شیب زیرآستانه، رسانایی انتقالی، بهره ولتاژ، دمای شبکه، خازن های پارازیتی، بهره های توان، فرکانس های قطع و بیشینه نوسانی، نسبت جریان روشن به خاموش و بهره نویز مینیمم مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و همه نتایج شبیه سازی شده نشان دهنده عملکرد الکتریکی و حرارتی مطلوب در حالت ماندگار و فرکانس بالای ساختار پیشنهادی است. بنابراین ساختار پیشنهادی با برطرف نمودن چالش های اساسی که برای افزاره های بدون پیوند مبتنی بر سیلیسیم روی عایق مطرح بود، می تواند به عنوان یک جایگزین بسیار مناسب آن در کاربردهای آنالوگ و دیجیتال فرکانس بالا به حساب آید.

مراجع

- [1] M. K. Anvarifard and A. A. Orouji, "Voltage difference engineering in SOI MOSFETs: a novel side gate device with improved electrical performance," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 6, no. 1, pp. 1672-1678, Dec. 2013.
- [2] M. Rahimian, A. A. Orouji, and A. H. Aminbeidokhti, "A novel deep submicron SiGe-on-insulator (SGOI) MOSFET with modified channel band energy for electrical performance improvement," *Current Applied Physics*, vol. 13, no. 4, pp. 779-784, Jun. 2013.
- [3] M. Mehrad, "Controlling floating body effect in high temperatures: L-shape SiGe region in nano-scale MOSFET," *Superlattices and Microstructures*, vol. 85pp. 573-580, Sep. 2015.
- [4] A. A. Orouji and M. Jagadesh Kumar, "A new symmetrical double gate nanoscale MOSFET with asymmetrical side gates for electrically induced source/drain," *Microelectron Engineering*, vol. 83, no. 3, pp. 409-414, Mar. 2006.

محمدکاظم انوری فرد در سال ۱۳۸۶ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه آزاد اسلامی و در سال ۱۳۸۸ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه حکیم سبزواری دریافت نمود. پس از آن در سال ۱۳۹۰ به دوره دکتری مهندسی برق در دانشگاه سمنان وارد گردید و در سال ۱۳۹۳ موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی برق از دانشگاه مذکور گردید. دکتر انوری فرد از سال ۱۳۹۴ در دانشکده فنی و مهندسی شرق گیلان دانشگاه گیلان مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشکده می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند مدل‌سازی افزاره‌های نانومقیاس، ولتاژ بالا و زیست حسگرها و ... است.

IEEE Trans. on Device and Materials Reliability, vol. 15, no. 4, pp. 536-542, Dec. 2015.