KNO-1204-5005

تحلیل و مقایسه جامع ترانزیستورهای اثر میدان پیشرفته (FinFET, CNTFET, GNRFET, FeFET, HEMT) برای کاربردهای توان پایین و فرکانس بالا

امین شیخ نجدی[۱] najdi@iaud.ac.ir
نسرین مجدی [۲] nasr698@gmail.com

۱-استادیار گروه الکترونیک دانشگاه آزاد اسلامی دزفول
۲-کارشناسی الکترونیک دانشگاه پیام نور دزفول

چکیده:

با نزدیک شدن فناوری نیمه‌هادی سیلیکونی به محدودیت‌های فیزیکی خود در اندازه های زیر ۵ نانومتر، ترانزیستورهای ماسفت مسطح (***Planar MOSFET***) دیگر پاسخگوی نیازهای عملکردی و توان پایین مدارهای مجتمع نیستند. چالش‌هایی نظیر اثرات کانال کوتاه (***SCEs***)، جریان نشتی و چگالی توان، محققان را به سمت معماری‌های نوین و مواد جایگزین سوق داده است. این مقاله به بررسی و مقایسه فنی ترانزیستورهای سیلیکونی پیشرفته (***FinFET, NWFET/NSFET***)، ترانزیستورهای نانولوله کربنی و گرافنی (***CNTFET, GNRFET***)، ترانزیستورهای فروالکتریک (***FeFET***) و همچنین ترانزیستورهای مبتنی بر ترکیبات ***III-V*** مانند ***GaAs-FET*** و ***HEMT*** می‌پردازد. نتایج این بررسی نشان می‌دهد، در حالی که ***FinFET*** و ***NSFET*** گزینه های اصلی صنعت دیجیتال هستند، ادوات مبتنی بر ***III-V*** و ***HEMT*** به دلیل تحرک‌پذیری الکترونی فوق‌العاده، گزینه‌های بی‌رقیبی برای کاربردهای فرکانس بالا و سوئیچینگ با سرعت بسیار زیاد محسوب می شوند. همچنین ***FeFET*** و ***GNRFET*** راهکارهایی امیدوارکننده برای حافظه‌های کم‌توان ارائه می‌دهند.

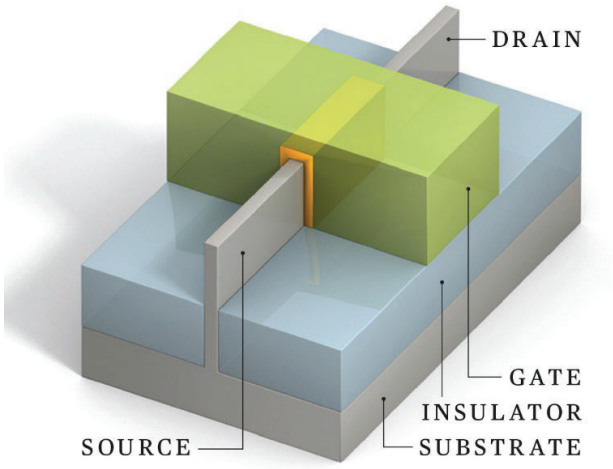
کلمات کلیدی :ترانزیستور اثر میدان، توان پایین، *FinFET*، *CNTFET*، *GNRFET*، *FeFET*، *HEMT* .

1. مقدمه

صنعت نیمه‌هادی‌ها در حال تجربه یک تغییر الگوی بنیادین است. افزایش نیاز به سامانه‌های الکترونیکی قابل‌حمل، کم‌مصرف و با کارایی بالا ـ از تلفن‌های همراه و رایانه‌های پیشرفته گرفته تا اینترنت اشیاء (IoT) و سخت‌افزارهای هوش مصنوعی (AI) ـ موجب شده است که طراحی مدارهای کم‌مصرف به اندازه افزایش توان محاسباتی اهمیت یابد [۱].ترانزیستورهای اثر میدانی مبتنی بر سیلیکون (MOSFET) که دهه‌ها ستون اصلی صنعت نیمه‌هادی بوده‌اند، به محدودیت‌های فیزیکی خود نزدیک شده‌اند. اگرچه قانون مور برای مدت طولانی راهنمای مقیاس‌بندی ترانزیستورها بوده است، اما امروزه کاهش مصرف توان و رفع چالش‌های مقیاس‌پذیری بیش از پیش اهمیت یافته است [۲],[۳]. این محدودیت‌ها به‌ویژه در حوزه‌های نوظهور مانند مراکز داده ابری و دستگاه‌های IoT با منابع انرژی محدود، اثرات چشمگیری بر عملکرد دارند. در پاسخ به این وضعیت، جامعه پژوهشی به‌طور گسترده به بررسی معماری‌های جایگزین پرداخته است؛ معماری‌هایی که ضمن حفظ سازگاری با فناوری CMOS بتوانند مشکلات مقیاس‌پذیری را برطرف کنند. در نقشه راه بین‌المللی دستگاه‌ها و سیستم‌ها (IRDS) سال ۲۰۲۲ [۴]، چندین توپولوژی ترانزیستوری نانومقیاس به‌عنوان گزینه‌های امیدبخش برای نسل‌های آینده معرفی شده‌اند. این دستگاه‌ها با هدف بهبود مقیاس‌پذیری، افزایش یکپارچگی الکترواستاتیکی، ارتقای سرعت سوئیچینگ و کاهش توان مصرفی طراحی شده‌اند، بدون آنکه از بستر تثبیت‌شده ساخت CMOS فاصله بگیرند [۵]. از جمله مهم‌ترین معماری‌های مطرح می‌توان به ترانزیستورهای اثر میدانی فروالکتریک (FeFET)، ترانزیستورهای نانولوله کربنی (CNTFET)، ترانزیستورهای نانوسیم (NWFET)، ترانزیستورهای نانوصفحه‌ای (NSFET) و FinFETهای سه‌گانه اشاره کرد. هر یک از این معماری‌ها مزایای خاصی مانند کنترل بهتر کانال، سوئیچینگ با شیب تند (steep-slope) یا امکان ادغام حافظه و منطق را ارائه می‌دهند و مسیرهای نوآورانه‌ای در علم مواد و مهندسی دستگاه فراهم می‌سازند. با این حال، کوچک‌سازی ابعاد ترانزیستور به زیر ۱۰ نانومتر همچنان چالش‌برانگیز است؛ زیرا کاهش کنترل الکترواستاتیک گیت بر کانال موجب افزایش جریان نشتی و اتلاف توان استاتیک می‌شود.

۱-۱ گذار از ساختار مسطح به سه بعدی

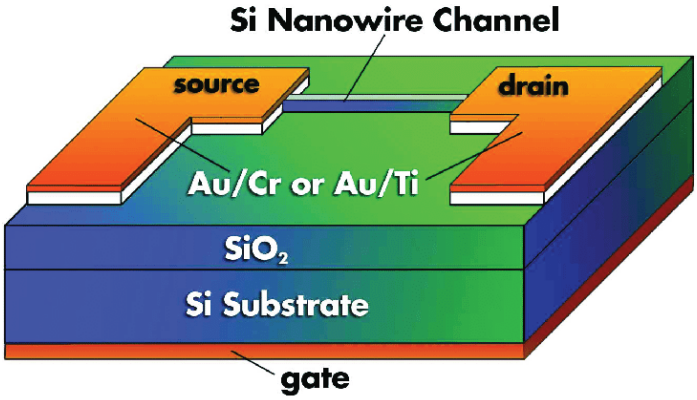
ترانزیستورهای FinFET (ترانزیستور اثر میدان باله دار) اولین پاسخ صنعت به این چالش‌ها بودند. با سه بعدی کردن کانال و احاطه شدن آن توسط گیت از سه طرف، کنترل بهتری بر کانال حاصل شد که منجر به کاهش اثرات کانال کوتاه گردید. این روش در تکنولوژی های ۲۲ نانومتر تا ۷ نانومتر پاسخ دهی مطلوبی دارد. با این حال، در ابعاد زیر ۵ نانومتر، FinFET نیز با محدودیت‌هایی در مدولاسیون عرض کانال و اثرات حرارتی مواجه است



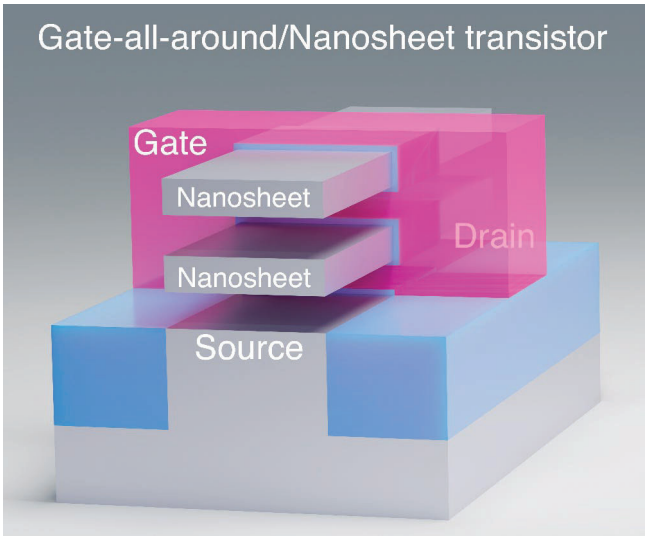
شکل ۱ : ساختار ترانزیستور FinFet

۲-۱ ظهور معماری‌های Gate-All-Around (GAA)

برای بهبود بیشتر، ساختارهای Nanowire FET (NWFET) و Nanosheet FET (NSFET) معرفی شدند که در آن‌ها گیت به‌طور کامل کانال را احاطه می‌کند. ، NSFETها به دلیل قابلیت تنظیم عرض ورقه‌ها (Sheets) و جریان درایو بالاتر، به عنوان جایگزین مستقیم FinFET در گره‌های ۳ نانومتر و پایین‌تر شناخته می‌شوند .



شکل ۲ : نمودار شماتیک یک Nanowire FET[6]



شکل ۳ : ساختار ترانزیستور Nanosheet FET

۳-۱ .مواد کانال جایگزین: کربن، فروالکتریک و ترکیبات III-V

علاوه بر تغییر ساختار، تغییر مواد سازنده نیز برای بهبود عملکرد ضروری است. موادی از جمله :

- **نانو کربنی :(CNT/Graphene)** نانولوله‌های کربنی و نانو روبان‌های گرافنی امکان ترابرد شبه‌بالستیک و تحرک‌پذیری بسیار بالا را فراهم می‌کنند
- **فروالکتریک‌ها :(FeFET)** استفاده از مواد فروالکتریک برای دستیابی به شیب زیرآستانه تند و حافظه غیرفرارمیباشد
- **ترکیبات :III-V** استفاده از ترکیب های عناصر ستون سوم و ستون پنجم جدول تناوبی مانند گالیم آرسنید (GaAs) و گالیم نیترید (GaN)که به دلیل تحرک‌پذیری الکترونی بسیار بالاتر نسبت به سیلیکون، برای کاربردهای سرعت بالا و RF مورد توجه هستند. [۷]

۱. بررسی و تحلیل فنی

در این بخش، ویژگی‌های فنی هر یک از ترانزیستورها بر اساس معیارهای تعیین شده تحلیل می‌شود.

۱-۲. ترانزیستورهای FinFET

• عملکرد: FinFETها جریان درایو بالایی (حدود ۱,۵ میلی‌آمپر بر میکرومتر) ارائه می‌دهند و تاخیر سوئیچینگ آن‌ها نسبت به ماسفت‌های مسطح ۳۷٪ کمتر است.

• چالش‌ها: محدودیت اصلی FinFETها "Quantization Width" است؛ یعنی عرض کانال تنها با اضافه کردن تعداد فین‌ها (Fin) قابل تغییر است که انعطاف‌پذیری طراحی را کاهش می‌دهد. همچنین، اثر خودگرمایی (Self-heating) به دلیل محبوس شدن حرارت در ساختار سه بعدی، یک چالش جدی است.

۲-۲. ترانزیستورهای مبتنی بر نانولوله کربنی (CNTFET)

• خصوصیات توان و کارایی: CNTها دارای تحرک‌پذیری حامل فوق‌العاده‌ای هستند (بیش از ۱۰ برابر سیلیکون). این امر باعث می‌شود محصول تاخیر-توان (EDP) بسیار پایینی داشته باشند. هدایت حرارتی بالای نانولوله‌ها نیز پایداری حرارتی را بهبود می‌بخشد.

•چالش‌ها: چالش اصلی در تولید انبوه، هم‌راستایی (Alignment) دقیق نانولوله‌ها، کنترل کایرالیته (Chirality) برای اطمینان از رفتار نیمه‌هادی (و نه فلزی) و مقاومت تماس اهمی است .

۲-۳ .ترانزیستورهای نانوروبان گرافنی(GNRFET)

- کاربرد در SRAM کم‌توان :گرافن به ذاته نیمه‌هادی نیست (گاف انرژی صفر)، اما با تبدیل آن به نانوروبان‌های باریک، گاف انرژی ایجاد می‌شودGNRFET .ها جریان نشتی بسیار پایینی در حالت خاموش دارند.
- تحلیل مقایسه‌ای :مطالعات نشان می‌دهد سلول‌های حافظه SRAM طراحی شده با GNRFET در مقایسه با تکنولوژی CMOS حتی(FinFET)، پایداری خواندن (Read Stability) و قابلیت نوشتن (Write-ability) بهتری دارند و مصرف توان استاتیک آن‌ها به شدت کاهش می‌یابد[۸]

۲-۴ .ترانزیستورهای فروالکتریک(FeFET)

- ویژگی منحصربه‌فردFeFET :ها از پسماند (Hysteresis) ذاتی مواد فروالکتریک(مانند HfO2) استفاده می‌کنند. این ویژگی دو مزیت دارد: ۱) قابلیت حافظه غیرفرار و ۲) تقویت ولتاژ داخلی که منجر به شیب زیرآستانه بسیار تند (Steep Slope < 60mV/dec) می‌شود.
- کارایی انرژی :این ترانزیستورها می‌توانند در ولتاژهای بسیار پایین (VDD < 0.5V) عمل کنند که آن‌ها را برای اینترنت اشیاء (IoT) ایده‌آل می‌سازد.

۲-۵ .ترانزیستورهای Nanowire و(GAA) Nanosheet

- کنترل الکترواستاتیک :این ساختارها بهترین کنترل را بر روی کانال دارند و عملاً اثرات کانال کوتاه را حذف می‌کنند.
- مقیاس‌پذیریNSFET :ها به دلیل سطح مقطع بزرگتر نسبت به نانوسیم‌ها، جریان بیشتری عبور می‌دهند و به دلیل سازگاری با فرآیندهای ساخت لایه‌نشانی موجود، جانشین طبیعی FinFET در صنعت هستند.

۲-۶ .ترانزیستورهای ترکیبات III-V و HEMT

- ترکیبات گروه سه-پنج مانندGaAs ، InGaAs، InP و GaN به دلیل خواص الکتریکی و اپتوالکترونیکی برتر، جایگاه ویژه‌ای در الکترونیک سرعت بالا دارند.
- ترانزیستورهای گالیم آرسنید : (GaAs-FET) این ترانزیستورها دارای تحرک‌پذیری الکترونی بسیار بالاتر (حدود ۸۵۰۰ سانتی‌متر مربع بر ولت-ثانیه) نسبت به سیلیکون (۱۴۰۰) هستند. این ویژگی باعث می‌شودGaAs-FET ها در فرکانس‌های بسیار بالاتر کار کنند. همچنین به دلیل گاف انرژی مستقیم، در کاربردهای اپتوالکترونیک) مانند لیزرها وLED ها (نیز استفاده می‌شوند

۳.مقایسه تطبیقی و نتایج

در جدول زیر خلاصه مقایسه این فناوری‌ها بر اساس معیارهای کلیدی ارائه شده است:

ویژگی / نوع ترانزیستور	FinFET	FeFET	CNTFET / GNRFET	NSFET (GAA)	HEMT / III-V FET
ماده کانال	سیلیکون(Si)	سیلیکون + فروالکتریک	نانولوله کربن / گرافن	سیلیکون/SiGe	GaAs, InGaAs, GaN
مکانیزم اصلی	کنترل سه بعدی	شیب تند / حافظه	ترابرد بالستیک	کنترل چهار طرفه	گاز الکترونی DEG۲
تحرک‌پذیری (Mobility)	متوسط	متوسط	بسیار عالی	خوب	بسیار عالی(>10,000)
مصرف توان	بهینه شده	(Low فوق کم‌توان VDD)	بسیار پایین	پایین	متوسط (بهینه برای سرعت)
کاربرد اصلی	پردازنده‌های عمومی	IoT، حافظهNVM	نانو الکترونیک آینده	HPC (3nm <)	RF، مخابرات، رادار
چالش اصلی	محدودیت ابعاد	پایداری مواد	تولید انبوه	پیچیدگی ساخت	هزینه و ادغام باSi

جدول ۱: مقایسه جامع فناوری‌های FET برای کاربردهای توان پایین و سرعت بالا

۳-۱. نتیجه‌گیری

برای کاربردهای دیجیتال و توان پایین در گره‌های تکنولوژی فعلی و آینده نزدیک (3nm و ۲(nm، معماری Nanosheet FET بهترین تعادل را بین عملکرد و قابلیت تولید ارائه می‌دهد FeFET .با قابلیت‌های منحصربه‌فرد خود، آینده حافظه‌های تعبیه شده و سیستم‌های فوق کم‌توان IoT را رقم خواهد زد.

در حوزه فرکانس بالا و سرعت‌های سوئیچینگ بسیار زیاد، ترانزیستورهای HEMT و GaAs-FET بی‌رقیب هستند و علی‌رغم هزینه بالاتر، در صنایع مخابراتی و فضایی غیرقابل جایگزین می‌باشند. در نهایت، CNTFET و GNRFET به عنوان کاندیداهای نهایی برای دوران پسا-سیلیکون (Post-Silicon)، پتانسیل شکستن تمامی رکوردهای فعلی را دارند، مشروط بر اینکه چالش‌های تولید انبوه آن‌ها مرتفع گردد.

۴. مراجع

[1] 1. Karimi K, Fardoost A, Javanmard M (2022) Comprehensive Review of FinFET Technology. Electronics 11(21):3589

[2] Sresta Valasa S, Tayal LR, Thoutam J, Ajayan S, Bhattacharyaet (2022) A critical review on performance, reliability, andfabrication of gate-all-around nanosheet and nanowire FETs, Materials Today: Proceedings

[3] Chen YR, Liu YC, Lin HC, Tu CT, Chou T, Huang BW, Hsieh WH, Chueh SJ, Liu CW (2023) Fabrication and performance ofhighly stacked GeSi nanowire FETs. Nat Electron 6:116–122

[4] Mukesh S, Zhang J (2022) A Review of the Gate-All-Around Nanosheet FET Process Opportunities. Electronics 11:21

[5] Kumari NA, Prithvi P (2023) A comprehensive analysis of nanosheet FET. Arab J Sci Eng

[6] Koo, S. M.; Edelstein, M. D.; Li, Q. L.; Richter, C. A.; Vogel, E. M. Silicon nanowires as enhancement-mode schottky barrier field-effect transistors. Nanotechnology 2005, 16(9), 1482–1485

[7] P. Ram and B. Raj, "A Comprehensive Analysis FinFET, FeFET, CNTFET, Nanowire FET and Nanosheet FET for Low Power Applications," *Research Square*, 2025.

[8] S. Suman and S. Nemade, "A Review of GNRFET based SRAM for Low-Power Applications," International Journal of Recent Development in Engineering and Technology (IJRDET), Vol. 13, Issue 4, April 2024.

[9] T. Hossain et al., "Performance Analysis of Graphene Nanoribbon Field Effect Transistor (GNRFET) based 6T and 7T SRAMs," 2020 23rd International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT), 2020.

[10] P. K. Patel, M. Malik and T. K. Gupta, "Optimization Techniques for Reliable Low Leakage GNRFET-Based 9T SRAM," IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, vol. 22, no. 4, 2022.