

افزاره آی ماس با ساختار نوار مهندسی شده (ناهمگون)

حمیده گدازگر، محمد کاظم مروج فرشی و مرتضی فتحی پور

کاهش در اندازه V_T باید کندتر یا برابر با آهنگ کاهش در V_{DD} باشد. با توجه به این که شیب زیرآستانه (S) در یک ماسفت معمولی با ساز و کار نفوذ حامل‌ها از سورس به درین محدود می‌شود و این ساز و کار به نوبه خود مشمول محدودیت ترمودینامیکی است، جریان آن به ازای $V_G = 0$ از رابطه زیر تبعیت می‌کند [۳]

$$I_D(V_G = 0) = I_D(V_G = V_T) \exp\left(-\frac{V_T}{S}\right) \quad (2)$$

این جریان به عنوان جریان نشستی ترانزیستور معروف است. با توجه به مطالب پیش گفته درباره رابطه کاهش ولتاژهای راه‌انداز و آستانه با کوچک‌سازی ابعاد تراشه‌ها و همچنین (۲) می‌توان دریافت که جریان نشستی و در نتیجه توان تلف‌شده در یک تراشه با کاهش ابعاد آن به صورت نمایی افزایش می‌یابد. برای اجتناب از این امر باید ترفندهایی اندیشید تا با آن بتوان همراه با کاهش V_T به خاطر کوچک‌سازی، شیب زیرآستانه را نیز کاهش داد.

گپالاکریشنان و همکاران [۲] برای اولین بار در سال ۲۰۰۲، افزاره آی ماس^۵ (IMOS) را با شیب زیرآستانه حدود ۵ mV/dec ارائه کردند. آی ماس یک دیود $p-i-n$ دارای گیت است که فقط بخشی از ناحیه ذاتی (کانال) را می‌پوشاند. به عبارت دیگر بخشی از کانل که بین سورس (p یا n) و درین (n یا p) قرار دارد زیر گیت قرار نمی‌گیرد. ساز و کار تولید حامل در این افزاره یونش برخوردی^۶ در کانال است [۲]. در یک آی ماس با اعمال بایاس V_G به گیت می‌توان میدان بین سورس و کانال را کنترل کرد. به ازای مقادیر کوچک V_G ، لایه وارون زیر گیت تشکیل نمی‌شود و در نتیجه طول مؤثر کانال برابر با طول تمام ناحیه ذاتی است. در این حالت بخش کوچکی از بایاس V_{DS} بر دو سر ناحیه ذاتی بدون گیت می‌افتد. با افزایش تدریجی V_G لایه وارون زیر گیت تشکیل شده و طول مؤثر کانال کاهش می‌یابد. به این ترتیب، بخش بزرگ‌تری از V_{DS} به ناحیه ذاتی بدون گیت تخصیص می‌یابد تا این که به ازای $V_G \geq V_T$ سهم تخصیص یافته به اندازه‌ای می‌رسد که یونش برخوردی در این ناحیه آغاز می‌شود [۴]. بنابراین اندازه ولتاژ درین-سورس V_{DS} لازم برای روشن کردن آن از طریق یونش برخوردی بزرگ است. در حالی که با کوچک‌شدن ابعاد باید این ولتاژ هم کوچک شود و این امر خود یکی از چالش‌های پیش روی آی ماس است [۵]. از جمله دیگر چالش‌های پیش روی این افزاره قابلیت اطمینان و ناپایداری ولتاژ آستانه آن در اثر یونش برخوردی است [۶].

تا کنون گروه‌های مختلفی برای بهبود ساختار آی ماس تلاش کرده‌اند [۵] تا [۱۱]. از جمله، گروهی ساختار آی ماس عمودی [۷] و گروهی دیگر آی ماس با ناحیه ذاتی L شکل [۸] را ارائه داده‌اند. در این دو ساختار سعی شده است تا محل تولید بیشینه حامل از لبه گیت دور نگه داشته شود. همچنین چوبی و همکاران [۱۲] روش جدیدی برای بایاس کردن افزاره ارائه کرده‌اند. در این روش به جای صفر کردن بایاس سورس، بسته به این

چکیده: الگوی جدیدی برای افزاره آی ماس با ساختار نوار مهندسی شده (ناهمگون) پیشنهاد و شبیه‌سازی شده است. با توجه به این که ناحیه ذاتی در یک آی ماس نقش کنترل‌کننده فرایند تونل‌زنی نوار به نوار را ایفا می‌کند و ساز و کار غالب تولید حامل درون این ناحیه یونش برخوردی است، در الگوی پیشنهادی فرض شده که ماده تشکیل‌دهنده ناحیه ذاتی از جنس Si_xGe_{1-x} ($0.5 \leq x \leq 1$) باشد و اندازه گاف نوار آن از اندازه گاف Si در لبه سورس تا گاف $Si_{0.5}Ge_{0.5}$ در لبه گیت به طور خطی تغییر کند. این امر سبب می‌شود تا بزرگ‌ترین اختلاف در گاف نوار الگوی پیشنهادی برابر $\Delta E_g = \Delta E_c = 0.32 \text{ eV}$ در فصل مشترک سورس و ناحیه ذاتی پدیدار شود و از احتمال وقوع تونل‌زنی نوار به نوار و در نتیجه از اندازه جریان خاموش بکاهد. نتایج عددی نشان می‌دهد ولتاژ شکست برای آی ماس ناهمگون پیشنهادی نسبت به یک ساختار آی ماس همگون از جنس $Si_{0.5}Ge_{0.5}$ با ابعاد مشابه، به اندازه 0.37 V و جریان خاموش آن حدود چهار برابر کاهش یافته است.

کلیدواژه: آی ماس، تونل‌زنی نوار به نوار، ولتاژ شکست، یونش برخوردی، نسبت جریان روشن به خاموش.

۱- مقدمه

یکی از اهداف مهم در طراحی افزاره‌های الکترونیک، کوچک‌سازی^۱ ابعاد آنها است. به خاطر غالب بودن ساز و کار نفوذ حامل در هدایت زیرآستانه^۲ ترانزیستورهای ماسفت^۳، حد پایین شیب زیرآستانه آنها در دمای اتاق برابر با ۶۰ mV/dec است [۱]. این به معنای گذاری آرام از حالت خاموش به روشن است و در روند کوچک‌سازی ماسفت‌ها به منظور دستیابی به نسبت جریان روشن به خاموش زیاد، چالشی جدی تلقی می‌شود [۲]. همراه با کوچک‌سازی ابعاد ترانزیستورها لازم است منابع ولتاژ راه‌انداز آنها (V_{DD}) نیز کاهش یابد. جریان راه‌انداز یک سی ماس^۴ پیشرفته به ازای هر میکرومتر از عرض آن از رابطه زیر تبعیت می‌کند [۳]

$$I_{DSat} = KC_{ox}(V_{DD} - V_T)^\alpha \quad (1)$$

که در آن K ثابت تناسب، C_{ox} ظرفیت خازن اکسید گیت، $1 < \alpha < 2$ پارامتر فیت وابسته به طول کانال و V_T ولتاژ آستانه است. از این معادله می‌توان دریافت که برای ثابت نگه داشتن یا افزایش جریان، آهنگ

این مقاله در تاریخ ۲۲ مهر ماه ۱۳۹۲ دریافت و در تاریخ ۲۳ فروردین ماه ۱۳۹۶ بازنگری شد.

حمیده گدازگر، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (email: hamide.godazgar@gmail.com).

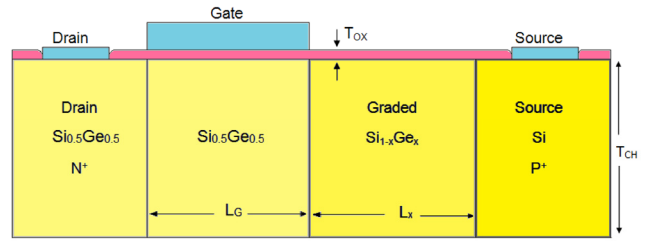
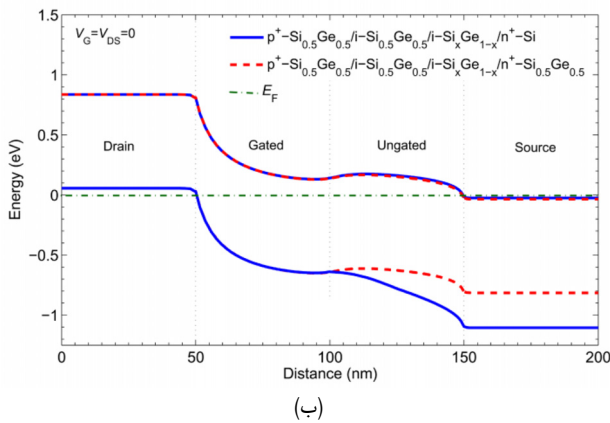
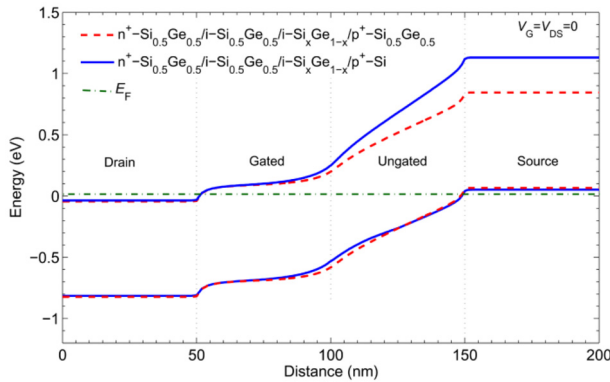
محمد کاظم مروج فرشی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (email: moravvej@modares.ac.ir).

مرتضی فتحی پور، گروه الکترونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، (email: mfathi@ut.ac.ir).

1. Scaling
2. Subthreshold
3. MOSFET
4. CMOS

5. Impact Ionization MOS

6. Impact Ionization



شکل ۱: شمای ساده‌ای از ساختار پیشنهادی آی ماس با نوار انرژی مهندسی شده نوع n .

جدول ۱: پارامترهای هندسی و فیزیکی به کار رفته در شبیه‌سازی ساختار پیشنهادی.

نماد	نام	اندازه	واحد
L_G	طول کانال گیت‌دار	۵۰	nm
L_x	طول کانال عاری از گیت	۵۰	nm
T_{CH}	ضخامت (عمق) کانال	۴۰	nm
T_{Box}	ضخامت اکسید بستر	۳۵۰	nm
T_{ox}	ضخامت اکسید گیت	۳	nm
ϵ_{ox}	ثابت دی‌الکتریک اکسید گیت	۳۹	-
N_{max}	بیشینه آرایش سورس و درین	10^{20}	cm^{-3}

که از نوع n یا p باشد به آن بایاس مثبت یا منفی اعمال می‌شود. به این ترتیب اختلاف پتانسیل سورس و کانال افزایش یافته و افزاره با V_{DS} کوچک‌تری به شکست می‌رسد.

در این مقاله، یک آی ماس با ساختار نوار انرژی مهندسی شده^۱ (BE-IMOS) (ساختار ناهمگون^۲) ارائه داده‌ایم. این ساختار ناهمگون به گونه‌ای طراحی شده است تا گاف انرژی^۳ در بخشی از کانال یعنی از سورس تا لبه گیت به صورت شیب‌دار کاهش یابد. به عبارت دیگر ماده تشکیل‌دهنده این ناحیه به تدریج از Si به $Si_{1-x}Ge_x$ تغییر یابد. این طراحی سبب شده تا هم احتمال تونل‌زنی نوار به نوار^۴ (BTBT) و هم ولتاژ شکست نسبت به آی ماس‌های پیشین [۱۱] و [۱۳] کاهش یابد.

در بخش‌های بعد به ترتیب به ارائه ساختار ناهمگون پیشنهادی، بررسی تفصیلی پارامترهای استفاده‌شده در شبیه‌سازی، تشریح چگونگی عملکرد افزاره، ارائه مشخصه الکتریکی، ولتاژ شکست و جریان خاموش آن می‌پردازیم و آن را با ساختارهای همگون^۵ از جنس Si و $Si_{1-x}Ge_x$ مقایسه می‌کنیم.

۲- آی ماس پیشنهادی با ساختار ناهمگون

شکل ۱ شمای دوبعدی ساده‌ای از ساختار ناهمگون پیشنهادی را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، تفاوت اساسی این ساختار پیشنهادی با ساختارهای همگون پیشین در گاف انرژی ماده تشکیل‌دهنده ناحیه ذاتی بدون گیت و گاف ناحیه سورس است. در مقدمه نیز اشاره شد که ماده سورس Si و ماده تشکیل‌دهنده ناحیه ذاتی بدون گیت Si_xGe_{1-x} است. اندازه ضریب مولی x از لبه گیت تا لبه سورس به طور تدریجی و به صورت خطی از یک به نیم و در نتیجه اندازه گاف انرژی مربوط نیز به طور خطی از 1.12 eV به 0.8 eV کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر و همان طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، ماده

1. Band Engineered-IMOS
2. Heterostructure
3. Energy Gap
4. Band to Band Tunneling
5. Homostructures (Homojunctions)

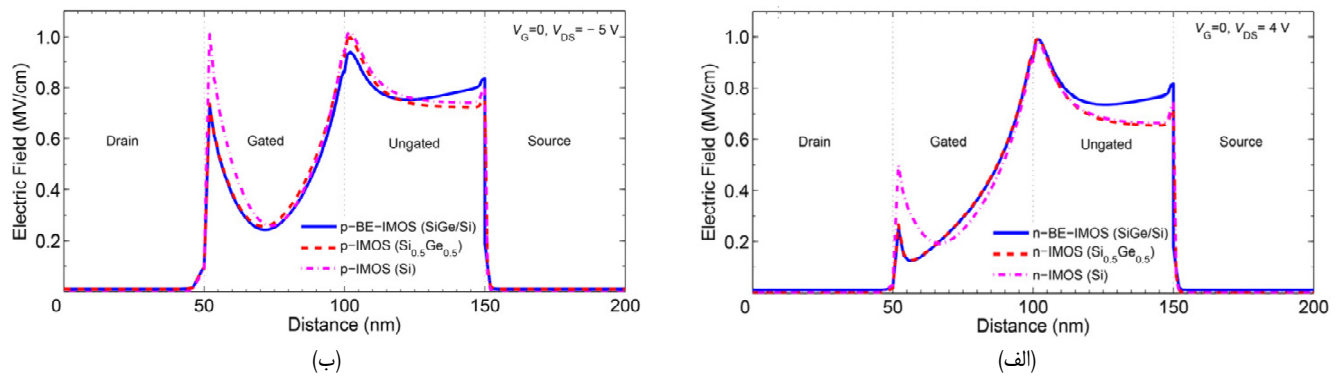
شکل ۲: مقایسه نمودار نوارهای انرژی ساختار ناهمگون (خط ممتد) و آی ماس همگون $Si_{1-x}Ge_x$ (خط چین) در حالت تعادل حرارتی (الف) نوع n و (ب) نوع p .

تشکیل‌دهنده بخش کانال زیر گیت و درین $Si_{1-x}Ge_x$ است. دلیل انتخاب این ماده برای ناحیه زیر گیت اندازه بزرگ قابلیت حرکت حامل‌های آن است در حالی که مهندسی ساختار نوار انرژی بخش عاری از گیت کانال برای مدیریت ساز و کار تونل‌زنی نوار به نوار بین سورس و بخش زیر گیت کانال انجام شده است. ساختار نمایش داده شده در شکل ۱ با توجه به نوع سورس (p^+) و درین (n^+)، به آی ماس نوع n معروف است. برخلاف آی ماس نوع n در آی ماس نوع p ناحیه سورس از نوع n^+ و ناحیه درین از نوع p^+ است. برای کمینه‌سازی جریان نشتی از درین و همچنین از سورس به بدنه ساختار آی ماس معمولاً بر روی یک بستر^۶ عایق بنا نهاده می‌شود [۱۰]. ابعاد هندسی برای ساختار پیشنهادی همراه با پارامترهای فیزیکی استفاده‌شده در شبیه‌سازی در جدول ۱ نمایش داده شده است. اکسید گیت از جنس SiO_2 و نیم‌رخ توزیع آرایش نواحی سورس و درین برای نزدیک‌بودن به واقعیت به صورت گوسی در نظر گرفته شده است.

۳- ساختار نوار انرژی در تعادل حرارتی

قبل از هر چیز، ابتدا نمودارهای ساختار نوار انرژی^۷ آی ماس پیشنهادی با پیوندهای ناهمگون از نوع n و p را با نمودارهای متناظر برای آی ماس همگون از جنس $Si_{1-x}Ge_x$ در تعادل حرارتی ($V_G = V_{DS} = 0$) مقایسه می‌کنیم. این مقایسه در شکل ۲ نمایش داده شده است. در شکل ۲- الف نمودار ساختار نوار انرژی افزاره ناهمگون نوع n در حالت تعادل حرارتی با خط ممتد و نمودار ساختار نوار انرژی

6. Substrate
7. Energy Band Structure



شکل ۳: مقایسه نمودار میدان الکتریکی در آی‌ماس ناهمگون (ممتد) با نمودارهای مشابه در آی‌ماس‌های همگون $Si_0.5Ge_0.5$ (خط‌چین) و Si (خط-نقطه) با بایاس گیت $V_G = 0$ برای (الف) نوع n به ازای $V_{DS} = 4V$ و (ب) نوع p به ازای $V_{DS} = -5V$.

جدول ۲: مقایسه ولتاژهای شکست، آستانه، جریان‌های روشن و خاموش برای آی‌ماس‌های همگون Si و $Si_0.5Ge_0.5$ و ناهمگون پیشنهادی با ابعاد مشابه.

آی‌ماس ناهمگون پیشنهادی		آی‌ماس همگون $Si_0.5Ge_0.5$		آی‌ماس همگون Si		$ V_G $ (V)
p	n	p	n	p	n	
۵,۲۶	-۴,۳	۵,۲۷	-۴,۶۴	۶,۶۵	-۶,۴۵	۰
۵,۰۹	-۴,۰۷	۵,۱	-۴,۴۲	۶,۵	-۶,۲۷	۰,۳
۴,۹۳	-۳,۹۳	۴,۹۳	-۴,۳	۶,۳۵	-۶,۱	۰,۵
-۰,۱۶	۰,۱۴	-۰,۱۸	۰,۱۴	-۰,۱۹	۰,۱۷	V_T (V)
5.5×10^{-4}	9.4×10^{-4}	6.4×10^{-4}	8.7×10^{-4}	6.4×10^{-4}	9.3×10^{-4}	I_{ON} (A/ μ m)
5.4×10^{-12}	1.5×10^{-12}	1.3×10^{-12}	5.7×10^{-12}	1.3×10^{-12}	1.3×10^{-12}	I_{OFF} (A/ μ m)

به گونه‌ای طراحی شود تا اندازه V_{BD} مقدارش کمینه شود. از طرف دیگر در یک افزاره با پیوندهای همگون هرچه اندازه گاف انرژی کوچک‌تر باشد احتمال وقوع پدیده شکست بهمنی در یک بایاس معین بیشتر می‌شود. در نتیجه، میدان مورد نیاز برای تولید زوج الکترون-حفره کمتر است و شکست بهمنی به ازای بایاس کوچک‌تری رخ می‌دهد. به همین سبب اندازه ولتاژ شکست آی‌ماس همگون ساخته‌شده از Si بزرگ‌تر از اندازه متناظر برای آی‌ماس همگون از جنس $Si_0.5Ge_0.5$ با ابعاد یکسان است. مقایسه ولتاژهای شکست آی‌ماس‌های مذکور با ابعادی مشابه ابعاد داده‌شده در شکل ۱ در جدول ۲ آمده است. با توجه به این که در تمام شبیه‌سازی‌های انجام‌شده $V_D = 0$ در نظر گرفته شده است در نتیجه ولتاژ شکست با ولتاژ اعمال‌شده به سورس تعیین می‌شود (یعنی $V_{BD} = V_S$). مقادیر ولتاژهای شکست حاصل از شبیه‌سازی برای افزاره‌های ناهمگون نوع p و n با ابعاد داده‌شده در شکل ۱ نیز در جدول ۲ آمده است.

مقایسه اندازه ولتاژهای شکست افزاره‌های نوع n نشان می‌دهد $|V_{BD}|$ برای آی‌ماس نوع n با پیوندهای ناهمگون، نسبت به اندازه‌های مربوط به آی‌ماس‌های همگون ساخته‌شده از Si و $Si_0.5Ge_0.5$ به ترتیب ۲/۱۵ و ۰/۳۴ ولت کوچک‌تر است. این مقایسه نشان می‌دهد مهندسی گاف انرژی آی‌ماس ناهمگون از کوچک‌سازی اندازه گاف ساختار همگون در کاهش ولتاژ شکست افزاره نقش مؤثرتری دارد زیرا مهندسی گاف در ناحیه ذاتی بدون گیت صورت گرفته است. از طرفی این ناحیه نقش بسیار مهمی در عملکرد افزاره آی‌ماس ایفا می‌کند و در واقع، این ناحیه محل وقوع یونش برخوردی حامل‌ها است.

در شکل ۳ توزیع میدان‌های الکتریکی برای سه افزاره ناهمگون (خط ممتد)، همگون از جنس $Si_0.5Ge_0.5$ (خط‌چین) و Si (خط-نقطه) به ازای ولتاژ معین $V_{DS} = 4V$ و نوع n به ازای ولتاژ معین $V_{DS} = -5V$ مقایسه شده است. در شکل ۳-الف دیده می‌شود که

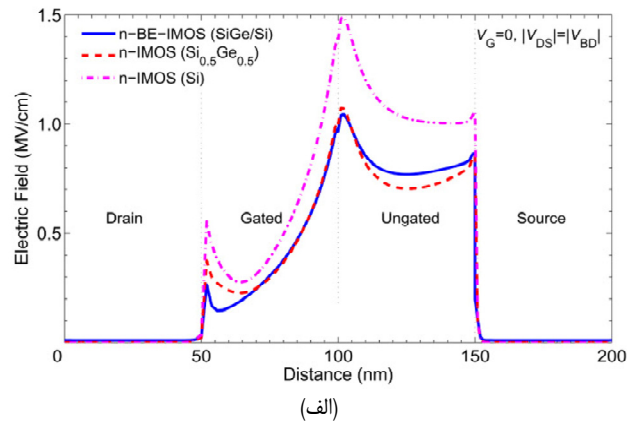
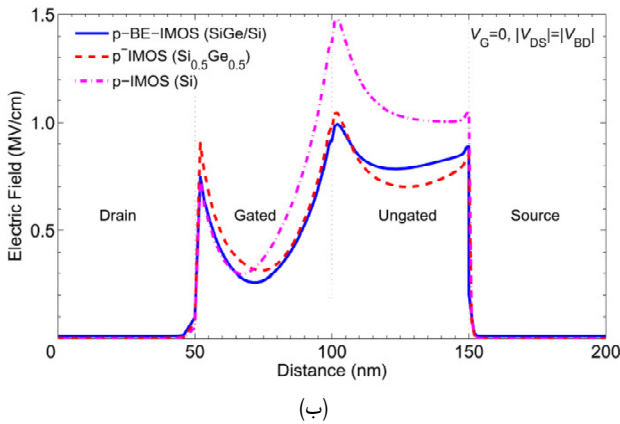
آی‌ماس‌های همگون از جنس $n-Si_0.5Ge_0.5$ با ابعاد مشابه نیز با خط‌چین نمایش داده شده است. نمودارهای متناظر برای افزاره‌های ناهمگون نوع p و همگون از جنس $p-Si_0.5Ge_0.5$ نیز در شکل ۲-ب با هم مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که در این مقایسه دیده می‌شود حامل‌ها در لبه سورس و سراسر ناحیه ذاتی بدون گیت ساختار ناهمگون با گاف انرژی بزرگ‌تری نسبت به ساختار همگون مواجه‌اند. بنابراین انتظار می‌رود با مهندسی گاف انرژی احتمال تونل‌زنی نوار به نوار در ساختار ناهمگون نسبت به احتمال بروز این پدیده در افزاره همگون کاهش یابد. در این باره در بخش مربوط به جریان خاموش به تفصیل بحث خواهد شد.

۴- کارکرد افزاره

در این بخش مشخصه‌های جریان روشن و خاموش در نقطه کار و تبعیت آنها از ولتاژ شکست ترانزیستور ارائه، تجزیه و تحلیل می‌شود. اندازه بایاس درین-سورس ($|V_{DS}|$) اعمالی در یک آی‌ماس در نقطه کار باید به ولتاژ شکست آن نزدیک و همواره از اندازه آن ($|V_{BD}|$) کوچک‌تر باشد. در این مقاله نقطه کار $|V_{DS} - V_{BD}| = 0.1V$ در نظر گرفته شده است. قبل از بررسی مشخصه‌های روشن و خاموش به بررسی ولتاژ شکست ساختارهای گوناگون آی‌ماس و تبعیت آنها از اندازه V_G می‌پردازیم.

۴-۱ ولتاژ شکست

در یک افزاره آی‌ماس، ولتاژ شکست (V_{BD}) برابر اندازه‌ای از V_{DS} است که به ازای آن افزاره به شکست بهمنی می‌رسد. چون بایاس نقطه کار یک آی‌ماس معمولاً در حوالی ولتاژ شکست آن انتخاب می‌شود، این ولتاژ یکی از ویژگی‌های بسیار مهم آی‌ماس است. یعنی یک آی‌ماس باید



شکل ۴: نمودار مقایسه نمودار میدان الکتریکی در آی ماس ناهمگون (ممتد) با نمودارهای مشابه در آی ماس های همگون $Si_{0.5}Ge_{0.5}$ (خط چین) و Si (خط-نقطه) به ازای بایاس های $V_G = 0$ و $|V_{DS}| = |V_{BD}|$ برای (الف) نوع n و (ب) نوع p .

می توان گفت که برآیند تغییرات میدان الکتریکی در این ناحیه برای این دو ساختار سبب می شود که ولتاژ شکست آنها تفاوت چندانی با یکدیگر نداشته باشند.

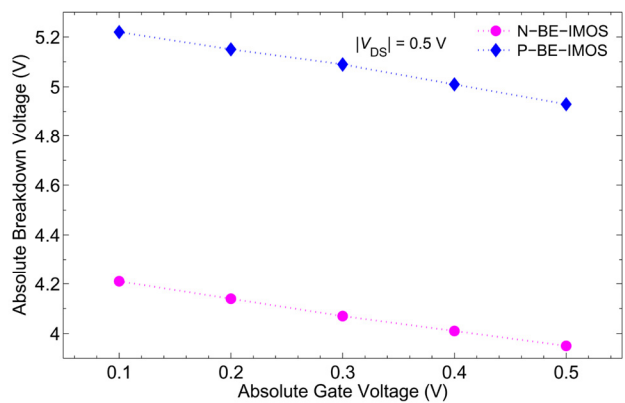
شکل ۴ نمودارهای توزیع میدان های الکتریکی را برای هر سه افزاره به ازای بایاس ولتاژ شکست هر کدام ($V_{DS} = V_{BD}$) و بایاس گیت صفر ($V_G = 0$) نشان می دهد. همان طور که دیده می شود اندازه سطح زیر هر منحنی بیانگر اندازه ولتاژ شکست افزاره مربوط است.

اینک به بررسی اثر اندازه بایاس گیت روی ولتاژ شکست آی ماس های نوع p و n پیشنهادی می پردازیم. شکل ۵ نمودار تغییرات $|V_{BD}|$ بر حسب $|V_G|$ را برای دو ساختار ناهمگون نوع n ($V_G > 0$ و $V_{BD} < 0$) و p ($V_G < 0$ و $V_{BD} > 0$) نشان می دهد. همان طور که در این شکل دیده می شود با افزایش $|V_G|$ برای هر دو ساختار اندازه ولتاژ شکست کاهش می یابد. با افزایش اندازه ولتاژ گیت، میدان الکتریکی در ناحیه ذاتی بدون گیت افزایش می یابد. نمودارهای نمایش داده شده در شکل ۶ مؤید این مطلب است. در این شکل توزیع میدان الکتریکی برای افزاره های نوع p و n به ترتیب به ازای $V_S = -3.93V$ و $V_S = +4.93V$ در سه ولتاژ گیت $0.3V$ ، $0.5V$ ، $0.7V$ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که بایاس سورس در هر افزاره برابر با ولتاژ شکست آن افزاره به ازای $|V_G| = 0.5V$ انتخاب شده و در واقع در این آی ماس ها ولتاژهای سورس و گیت مختلف علامه هستند. در نتیجه با افزایش اندازه ولتاژ گیت (سورس) اندازه $|V_{GS}|$ افزایش می یابد. این امر باعث افزایش میدان الکتریکی در ناحیه ذاتی بدون گیت می شود و در نتیجه بایاس $|V_{DS}|$ کوچک تری برای رسیدن به شکست لازم است.

۴-۲ مشخصه های جریان $I_D - V_G$

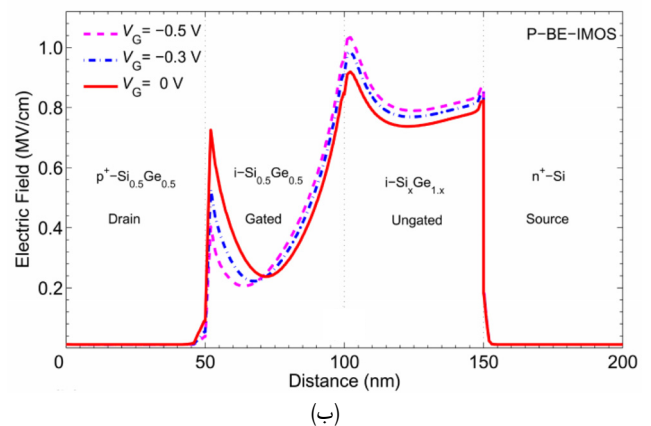
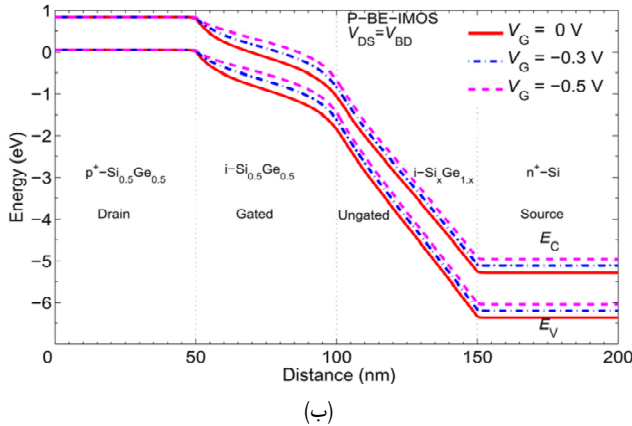
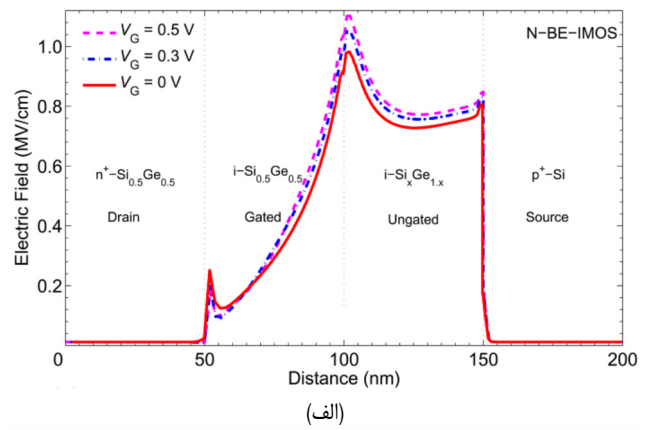
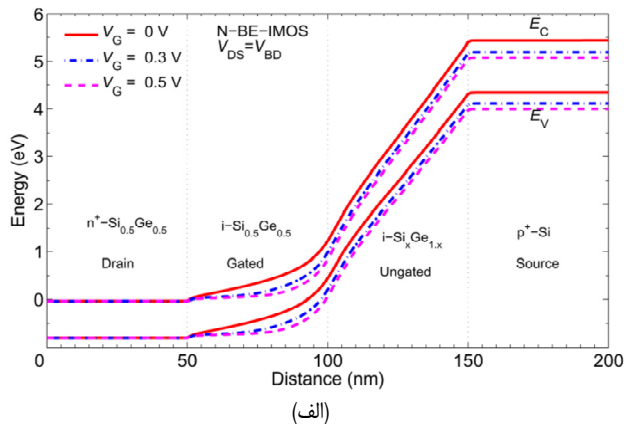
در این زیربخش برای بررسی مشخصه های $I_D - V_G$ افزاره های ناهمگون نوع n و p ، ابتدا نوارهای انرژی ساختار پیشنهادی برای دو نوع n و p به ترتیب تحت بایاس های $V_{DS} = 4.2V$ و $V_{DS} = -5.18V$ برای سه بایاس $0.3V$ ، $0.5V$ ، $0.7V$ محاسبه و در شکل ۷ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود حامل ها هنگام حرکت از سورس به سمت گیت، شکاف انرژی کوچک تری در مقابل خود می بینند و با توجه به انرژی دریافت شده از میدان، زوج الکترون-حفره تولید می کنند. با نزدیک شدن به لبه گیت و کاهش مداوم شکاف انرژی با انرژی کمتری می توان زوج الکترون-حفره تولید کرد.

نمودارهای $I_D - V_G$ برای دو ساختار ناهمگون نوع n و نوع p ، برای یک نقطه کار به فاصله $0.1V$ از ولتاژ شکست در شکل ۸ رسم



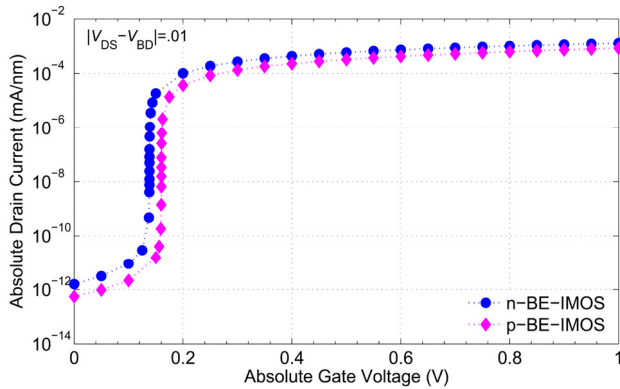
شکل ۵: نمودار تغییرات ولتاژ شکست بر حسب ولتاژ گیت اعمال شده به آی ماس های ناهمگون نوع n (دایره توپُر) و نوع p (لوزی توپُر).

میدان های الکتریکی در ناحیه ذاتی بدون گیت برای آی ماس ناهمگون بیش از میدان الکتریکی برای هر دو آی ماس همگون است اما تفاوت میدان های الکتریکی برای دو آی ماس همگون در ناحیه مذکور، علی رغم گاف انرژی های متفاوت چندان زیاد نیست. به ازای یک بایاس V_{DS} معین، هرچه میدان در ناحیه ذاتی بدون گیت بزرگ تر باشد، حامل ها پرانرژی تر هستند و احتمال وقوع یونش برخوردی بیشتر است. لذا برای افزاره ای که میدان در آن بزرگ تر است ولتاژ شکست زودتر (به ازای بایاس کوچک تر) حاصل می شود. از طرف دیگر با مقایسه ولتاژ شکست آی ماس ناهمگون نوع p با ولتاژ شکست آی ماس همگون نوع p از جنس $Si_{0.5}Ge_{0.5}$ درمی یابیم که تفاوت آنها چندان زیاد نیست. شکل ۳-ب توزیع میدان های الکتریکی در سه افزاره نوع p را مقایسه می کند. در این شکل دیده می شود که میدان الکتریکی در ناحیه ذاتی بدون گیت برای افزاره های همگون $p-Si_{0.5}Ge_{0.5}$ و $p-Si$ اختلاف ناچیزی دارند. از طرفی بر خلاف آنچه در مقایسه افزاره های نوع n مشاهده شد میدان الکتریکی در ناحیه ذاتی بدون گیت افزاره ناهمگون نوع p همواره از میدان الکتریکی در ساختار $p-Si_{0.5}Ge_{0.5}$ بزرگ تر نیست بلکه در بخشی از ناحیه ذاتی بدون گیت در مجاورت سورس برای افزاره ناهمگون نوع p بزرگ تر و در باقیمانده این ناحیه به ویژه در لبه گیت برای آی ماس $p-Si_{0.5}Ge_{0.5}$ بزرگ تر است. این تفاوت ناشی از اثر مهندسی نوار انرژی است. بنابراین حامل هایی که از سورس وارد کانال می شوند برای آی ماس ناهمگون نوع p در نزدیکی سورس و برای $p-Si_{0.5}Ge_{0.5}$ در نزدیکی گیت نیروی بیشتری از میدان دریافت می کنند و باعث یونش برخوردی می شوند. در نتیجه از این لحاظ یکی بر دیگری برتری ندارد و



شکل ۷: مقایسه نمودار نوارهای انرژی افزاره ناهمگون به ازای سه $V_G = 0, 0.3, 0.5$ V (خط منقطع) با آی‌ماس همگون $Si_{0.5}Ge_{0.5}$ (خط چین)، (الف) نوع n و (ب) نوع p به ازای بایاس‌های $0.3, 0.5, 0.7$ V. $V_{DS} = V_{BD}$ و $|V_G| = 0$.

شکل ۶: مقایسه نمودار توزیع میدان الکتریکی در افزاره ناهمگون به ازای سه $V_G = 0, 0.3, 0.5$ V (خط منقطع) و بایاس $|V_G| = 0, 0.3, 0.7$ V (الف) برای نوع n و (ب) $V_{DS} = -4.93$ V برای نوع p .



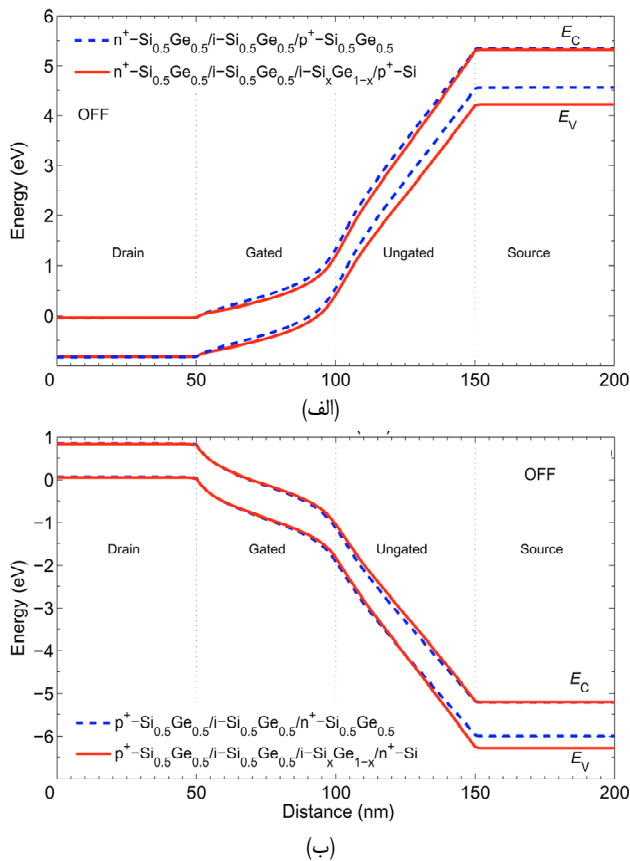
شکل ۸: منحنی جریان درین بر حسب ولتاژ گیت برای ساختارهای آی‌ماس ناهمگون نوع n و p .

شکست کاهش می‌یابد و در نتیجه اندازه ولتاژ نقطه کار افزاره نیز به تناسب کاهش می‌یابد. بنابراین به ازای $V_S - V_{BD}$ برابر، تونل‌زنی نوار به نوار در افزاره با گاف انرژی بزرگتر بیشتر است زیرا به علت بزرگتر بودن گاف انرژی، ولتاژ شکست و در نتیجه ولتاژ سورس در آن بزرگتر است. با توجه به قسمت قبل مثلاً در آزمایشات نوع n برای آی‌ماس Si_x به ازای $V_S - V_{BD} = 0.2$ V، ولتاژ سورس باید 6.25 V- باشد برای آی‌ماس $Si_{0.5}Ge_{0.5}$ باید 4.44 V- و برای آی‌ماس ناهمگون باید 4.1 V- باشد. همان‌طور که دیده می‌شود ولتاژ سورس در آی‌ماس ناهمگون کمتر است. از آنجا که در این ساختار Si با گاف انرژی بزرگتر در سمت سورس قرار گرفته، جریان خاموش آن حتی از ساختار همگون $Si_{0.5}Ge_{0.5}$ نیز کمتر است.

شده است. اندازه شیب جریان زیرآستانه محاسبه شده برای آی‌ماس ناهمگون نوع n و p یکسان و برابر 2.5 mV/dec است. مقادیر ولتاژهای آستانه و جریان‌های روشن این دو آی‌ماس با مقادیر متناظر برای آی‌ماس‌های همگون $n(p) - Si_{0.5}Ge_{0.5}$ و $n(p) - Si$ در جدول ۲ مقایسه شده و لازم به ذکر است جریان روشن به ازای $|V_G| = |V_T| + 0.6$ استخراج شده است.

۳-۴ جریان خاموش

جریان خاموش بنا به تعریف، اندازه جریان درین به ازای $V_{GD} = 0$ برای بایاس نقطه کار V_{DS} است. در این زیربخش به تأثیر اندازه بایاس نقطه کار روی اندازه جریان خاموش آی‌ماس ناهمگون پیشنهادی نوع $n(p)$ در مقایسه با آی‌ماس همگون $n(p) - Si_{0.5}Ge_{0.5}$ می‌پردازیم. نتایج حاصل از محاسبات در شکل ۹ مقایسه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد به طور کلی در یک آی‌ماس هر قدر فاصله بایاس نقطه کار از ولتاژ شکست بیشتر شود (یعنی $|V_{BD} - V_S|$ افزایش یابد) اندازه جریان خاموش کاهش می‌یابد و علاوه بر این در این مقایسه ملاحظه می‌شود به ازای $|V_{BD} - V_S|$ معین جریان خاموش برای آی‌ماس ناهمگون نوع $n(p)$ کمتر از اندازه متناظر برای آی‌ماس همگون $n(p) - Si_{0.5}Ge_{0.5}$ با ابعاد مشابه است. این تفاوت به خاطر این است که پدیده غالب در تعیین جریان خاموش آی‌ماس پدیده تونل‌زنی نوار به نوار است. هرچه گاف انرژی مواد تشکیل‌دهنده در طرف سورس کوچک‌تر باشند احتمال وقوع تونل‌زنی نوار به نوار بیشتر و در نتیجه اندازه جریان خاموش بزرگتر می‌شود. از طرف دیگر هرچه گاف انرژی کوچک‌تر باشد احتمال وقوع پدیده یونش برخوردی در یک بایاس معین بیشتر و در نتیجه اندازه ولتاژ



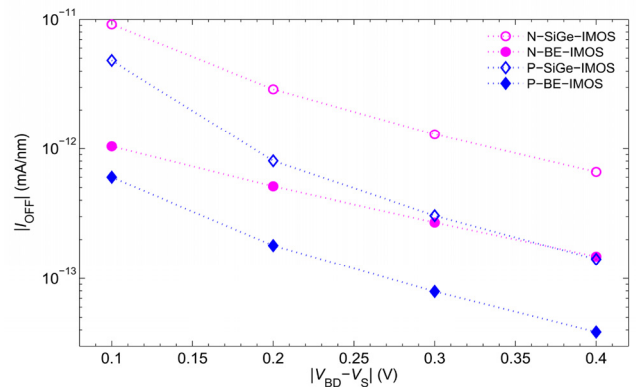
شکل ۱۰: مقایسه نمودار نوارهای انرژی آی ماس ناهمگون (خط ممتد) با آی ماس همگون Si_xGe_{1-x} (خط چین) در حالت خاموش (الف) نوع n و (ب) نوع p .

جنس Si است که گاف انرژی آن از گاف Si_xGe_{1-x} (برای $0 \leq x < 1$) بزرگتر است. بنابراین حامل‌ها در تمام نواحی ساختار پیشنهادی جدید که احتمال تونل‌زنی در آنها وجود دارد نسبت به حامل‌ها در آی ماس همگون Si_xGe_{1-x} با سد پتانسیل پهن‌تری روبه‌رو می‌شوند. این امر احتمال تونل‌زنی نوار به نوار را در آی ماس ناهمگون کاهش می‌دهد. در نتیجه، کوچک‌سازی ساختار آی ماس ناهمگون نسبت به آی ماس همگون Si_xGe_{1-x} با محدودیت کمتری روبه‌رو خواهد شد.

کاهش احتمال تونل‌زنی نوار به نوار باعث کاهش جریان خاموش آی ماس ناهمگون خواهد شد. جریان خاموش آی ماس ناهمگون $n(p)$ از جریان خاموش آی ماس همگون Si_xGe_{1-x} مشابه چهار (سه) مرتبه کوچکتر است اما جریان روشن آی ماس ناهمگون نوع n از جریان همتای همگون خود ۸٪ بیشتر است در حالی که جریان روشن آی ماس ناهمگون نوع p از جریان همتای همگون خود ۱۴٪ کمتر است.

مراجعه

- [1] F. Mayer, C. Le Royer, G. Le Carval, L. Clavelier, and S. Deleonibus, "Experimental and TCAD investigation of the two components of the impact ionization MOSFET (IMOS) switching," *IEEE Electron Dev. Lett.*, vol. 28, no. 7, pp. 619-621, Jul. 2007.
- [2] K. Gopalakrishnan, P. B. Griffin, and J. D. Plummer, "I-MOS: a novel semiconductor device with a subthreshold slope lower than kT/q ," in *Proc. Int. Electron Devices Meeting, IEDM'02*, pp. 289-292, 8-11 Dec. 2002.
- [3] K. Gopalakrishnan, P. B. Griffin, and J. D. Plummer, "Impact ionization MOS (I-MOS)-part i: device and circuit simulations," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 52, no. 1, pp. 69-76, Jan. 2005.
- [4] W. Y. Choi, *Impact-Ionization Metal-Oxide-Semiconductor (I-MOS) Devices Using Avalanche Breakdown Mechanism*, Ph.D. Dissertation, College of Eng, Seoul National Univ., 2006.
- [5] E. H. Toh, G. H. Wang, L. Chan, G. Samudra, and Y. C. Yeo, "A double-spacer I-MOS transistor with shallow source junction and



شکل ۹: مقایسه تغییرات جریان خاموش بر حسب $|V_{BD} - V_S|$ برای آی ماس‌های ناهمگون و همگون Si_xGe_{1-x} نوع n و p .

باید توجه داشت که در یک آی ماس فرایند تونل‌زنی نوار به نوار در لبه سورس و داخل ناحیه ذاتی بدون گیت رخ می‌دهد. در ساختار ناهمگون، سورس از جنس Si است که به علت گاف انرژی بزرگتر نسبت به Si_xGe_{1-x} تونل‌زنی نوار به نوار را در لبه سورس کاهش می‌دهد. گاف انرژی در ناحیه ذاتی بدون گیت در تونل‌زنی نوار به نوار و نرخ تولید در اثر یونش برخوردی مؤثر است. به گونه‌ای که افزایش گاف انرژی در این ناحیه اگرچه تونل‌زنی نوار به نوار را بهبود می‌بخشد اما نرخ تولید حامل را کاهش می‌دهد. بنابراین صرفاً تغییر ماده در این ناحیه با یک گاف انرژی ثابت نمی‌تواند مؤثر باشد. در ساختار ناهمگون گاف انرژی Si_xGe_{1-x} (ناحیه ذاتی بدون گیت) کمی از گاف Si کمتر و از گاف Si_xGe_{1-x} بیشتر در نظر گرفته شده است. اولی باعث افزایش نرخ تولید در اثر یونش برخوردی و دومی باعث کاهش احتمال تونل‌زنی نوار به نوار می‌شود.

در شکل ۱۰ نمودار نوار انرژی ساختار ناهمگون و با نوار انرژی آی ماس همگون Si_xGe_{1-x} در حالت خاموش مقایسه شده‌اند. در این شکل به خوبی دیده می‌شود که در ساختار ناهمگون گاف انرژی در سراسر ناحیه ذاتی بدون گیت (از لبه سورس تا لبه گیت) از گاف انرژی ساختار آی ماس Si_xGe_{1-x} بزرگتر است. بنابراین حامل‌ها با سد پتانسیل پهن‌تری مواجه می‌شوند و احتمال این که بتوانند با دریافت انرژی از میدان از نواری به نوار دیگر تونل بزنند کاهش می‌یابد. به این ترتیب جریان خاموش در آی ماس ناهمگون کوچکتر است.

شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار ATLAS انجام شده است. از آنجایی که نتایج تجربی گذشته صحت الگوی^۱ میدان موضعی^۲ را برای یونش برخوردی در ابعاد استفاده شده در این ساختار تأیید کرده‌اند [۱۴]، در این شبیه‌سازی‌ها نیز از این الگو استفاده شده است که در آن ضرایب یونش برخوردی به صورت نمایی به میدان الکتریکی وابسته‌اند. همچنین تونل‌زنی نوار به نوار نیز در الگوها لحاظ شده است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، ساختار جدید آی ماس با نوار انرژی مهندسی شده ارائه شد که در آن با مهندسی گاف انرژی از طریق استفاده از مواد با گاف انرژی متفاوت، ولتاژ شکست بهبود یافته است. این ساختار به گونه‌ای تعریف شده که ولتاژ شکست آن در نوع n از ماده با گاف انرژی کوچکتر نیز کمتر است. با مهندسی نوار انرژی در ساختار ناهمگون، از قابلیت‌های ذاتی دو ماده استفاده مطلوب شده است. در آی ماس ناهمگون سورس از

1. Model
2. Local-Field

محمدکاظم مروج فرشی مدارک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را در رشته‌ی فیزیک به ترتیب در سال‌های ۱۳۵۵ و ۱۳۵۷ از دانشگاه‌های صنعتی شریف و کالیفرنیا (USC) اخذ کرد. پس از آن برای ادامه‌ی تحصیل در زمینه‌ی افزارهای نیم‌رسانا از مهرماه ۱۳۵۷ به دانشکده مهندسی برق دانشگاه کالیفرنیا در سانتا باربارا (UCSB) وارد و مشغول به ادامه تحصیل شد. قبل از اتمام دوره دکتری در اسفند ماه ۱۳۵۸ به ایران بازگشت. در اردیبهشت ۱۳۵۹ در بخش میکروویو مرکز تحقیقات مخبرات ایران مشغول به کار شد. نام‌برده درجه دکتری خود را در زمینه ساخت افزارهای نیم‌رسانا در اردیبهشت ۱۳۶۶ از دانشگاه نیوساوت‌ویلز (UNSW) اخذ کرد. دکتر مروج فرشی در پانزده خرداد همان سال به ایران مراجعت کرد و با مرتبه استادیاری به جرگه‌ی اعضای هیأت علمی دانشگاه پیوست.

نام‌برده، هم‌اینک با مرتبه استاد تمام پایه‌ی ۴۱ در گروه الکترونیک دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس به تدریس و پژوهش در زمینه‌های نانوالکترونیک و نانوفوتونیک مشغول است.

دکتر مروج فرشی در سال تحصیلی ۸۱-۱۳۸۰ به عنوان استاد نمونه کشوری نائل آمد. نام‌برده یک مجموعه چهار جلدی کتاب در زمینه افزارهای نیم‌رسانا با عنوان‌های «مبانی نیمه هادی»، «دیود پیوندی pn»، «ترانزیستور دوقطبی پیوندی» و «دوات FET» ترجمه کرده است، که همه توسط مؤسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف منتشر و چندین بار تجدید چاپ شده است. کتاب دیگری که دکتر مروج فرشی ترجمه کرده و توسط همان انتشارات منتشر شده است «الکترونیک لیزر» نام دارد که جایزه بهترین کتاب ترجمه سال ۱۳۸۲ در زمینه علوم کاربردی و مهندسی را به خود اختصاص داده است.

دکتر مروج فرشی سمت‌های دبیری کمیته‌های علمی کنفرانس‌های متعددی از جمله کنفرانس مهندسی برق ایران و کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران را در چند دوره مختلف برعهده داشته است.

دکتر مروج فرشی عضو ارشد انجمن مهندسی برق و الکترونیک (IEEE) و نیز عضو ارشد انجمن اپتیک آمریکا (OSA) است. نام‌برده یکی از بنیان‌گذاران انجمن اپتیک و فوتونیک ایران است و از اعضای اولین دوره هیأت مدیره این انجمن بوده است و در حال حاضر رییس هیأت مدیره این انجمن است.

مرتضی فتحی‌پور مدرک دکترای مهندسی برق و الکترونیک خود را در حوزه الکترونیک حالت جامد در سال ۱۳۶۶ از دانشگاه ایالتی کلرادو اخذ نمود. وی در حال حاضر دانشیار دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه تهران و نیز بنیانگذار و سرپرست آزمایشگاه‌های شبیه‌سازی و مدل‌سازی افزار و سامانه‌های الکترومکانیکی ریز و بسیار ریز است.

- lightly doped drain for reduced operating voltage and enhanced device performance," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 29, no. 2, pp. 189-191, Feb. 2008.
- [6] E. H. Toh, G. H. Wang, L. Chan, G. Q. Lo, G. Samudra, and Y. C. Yeo, "I-MOS transistor with an elevated silicon-germanium impact-ionization region for bandgap engineering," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 27, no. 12, pp. 975-977, Dec. 2006.
- [7] U. Abelein, M. Born, K. K. Bhuiwarka, M. Schindler, M. Schmidt, T. Sulima, and I. Eisele, "A novel vertical impact ionization MOSFET (I-MOS) concept," in *Proc. 5th Int. Conf. Microelectronics*, pp. 121-123, Belgrade, Serbia and Montenegro, 14-17 May 2006.
- [8] E. H. Toh, et al., "A novel CMOS compatible L-shaped impact-ionization MOS (LI-MOS) transistor," in *Proc. Int. Electron Devices Meeting, IEDM'05*, pp. 951-954, 5-5 Dec. 2005.
- [9] F. A. Hassani, M. Fathipour, and M. Mehran, "A comparison study between double and single gate p-IMOS," *AFRICON*, Windhoek, 7 pp., 26-28 Sept. 2007.
- [10] D. Sarkar, N. Singh, and K. Banerjee, "A novel enhanced electric-field impact-ionization MOS transistor," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 31, no. 11, pp. 1175-1177, Nov. 2010.
- [11] H. Nematian, M. Fathipour, and M. Nayeri, "A novel impact ionization MOS (I-MOS) structure using a silicon-germanium/silicon heterostructure channel," in *Proc. Int. Conf. on Microelectronics*, pp. 228-231, 14-17 Dec. 2008.
- [12] W. Y. Choi, J. Y. Song, J. D. Lee, Y. J. Park, and B. G. Park, "A novel biasing scheme for I-MOS (impact-ionization MOS) devices," *IEEE Trans. Nanotechnology*, vol. 4, no. 3, pp. 322-325, May 2005.
- [13] F. Mayer, C. L. Royer, G. L. Carval, L. Clavelier, and S. Deleonibus, "Static and dynamic TCAD analysis of IMOS performance: from the single device to the circuit," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 53, no. 8, pp. 1852-1857, Aug. 2006.
- [14] K. Gopalakrishnan, R. Woo, C. Jungemann, P. B. Griffin, and J. D. Plummer, "Impact ionization MOS (I-MOS)-part ii: experimental results," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 52, no. 1, pp. 77-84, Jan. 2005.

حمیده گدازگر در سال ۱۳۸۷ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه مازندران و در سال ۱۳۹۰ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه تربیت مدرس دریافت نمود. وی در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ در دانشگاه علوم و فنون مازندران مشغول به تدریس بوده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: افزارهای نیمه‌هادی نانو ساختار، افزارهای الکترونیک مبتنی بر نانولوله‌های کربنی، سلول‌های خورشیدی.

خانم گدازگر در حال حاضر به عنوان مدیر فنی در گروه روشنایی گلنور مشغول به فعالیت می‌باشد.