تحلیل و بهبود جریان حالت خاموش نانو ماسفت کرنشی دومحوره سیلیکانی نوع p با کنترل چگالی ناخالصی زیرلایه مجازی

محمدمهدی خاتمی[1] مجید شالچیان[2] محمدرضا کلاهدوز[3]

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تربیت مدرس- تهران- ایران
mmkhatami@aut.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر - تهران- ایران
shalchian@aut.ac.ir

۳-استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران - تهران- ایران
kolahdouz@ut.ac.ir

چکیده: در ماسفت کرنشی دومحوره نوع p سیلیکانی، وجود کانال پارازیتی موازی کانال اصلی، با افزایش جریان حالت خاموش، عملکرد ماسفت را با مشکل مواجه می‌کند. در این مقاله، روشی برای حذف این کانال پارازیتی و بهبود جریان حالت خاموش، با کنترل چگالی ناخالصی زیرلایه مجازی ارائه می‌شود و سپس بوسیله‌ی شبیه ساز، نتایج بررسی می‌گردد. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد با افزایش دوپینگ بستر مجازی تا مقدار $۴\times۱۰^{۱۷}\ cm^{-3}$، ضمن تشکیل کانال با موبیلیتی موثر بالا، جریان حالت خاموش تا بیش از $۱۰^{-۴}$ برابر کاهش می‌یابد. این روش در طول کانال‌های مختلف موثر بوده و همچنین باعث بهبود مقاومت خروجی ماسفت می‌گردد.

کلمات کلیدی: نانو ماسفت کرنشی نوع p، جریان حالت خاموش، چاه کوانتومی، کانال پارازیتی، بستر مجازی

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۳/۵/۲۶

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۵/۴/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۵/۴/۲۳

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مجید شالچیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – تهران – خیابان حافظ – پلاک ۴۲۴ – دانشگاه صنعتی امیرکبیر – دانشکده‌ی برق

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.4.5.5]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.4-Winter 2016

۱- مقدمه

مور[۱] در سال ۱۹۶۵ پیش بینی کرد هر ۱۸ ماه تعداد قطعات نیمه هادی مجتمع سازی شده، بر واحد سطح دوبرابر می‌شود. این پیش بینی تاکنون به طرز حیرت آوری به وقوع پیوسته است. اما اکنون، این قانون با مشکلاتی نظیر افزایش جریان نشتی، تلفات و خنک سازی مواجه شده است. بنابراین توجهات به سوی بهبود عملکرد قطعه همزمان با تلاش برای مجتمع سازی معطوف گردید. [۱]–[۴]

یک راه حل استفاده از ژرمانیم برای بهبود خواص ماسفت است. ژرمانیم، به دلیل ارزان‌تر بودن نسبت به نیمه هادی‌های ترکیبی و سازگاری با تکنولوژی ساخت مدارهای مجتمع سیلیکانی توجهات زیادی را به سوی خود جلب کرده است.[۵]

دو روش برای استفاده از ژرمانیم برای بهبود خواص سیلیکان وجود دارد که هردو مبتنی بر ایجاد کرنش[۲] از طریق اعمال تنش[۳] بر ساختار شبکه سیلیکان است. اولین مورد، برمبنای ایجاد کرنش شبکه سیلیکان در دومحور[۴] و مورد دوم، برمبنای کرنش در یک محور[۵] استوار است.[۶]

در این مقاله، روش اول مورد استفاده قرار گرفته است که در این روش، سیلیکان بر روی لایه ضخیمی از جنس SiGe ریلکس[۶] رشد داده می‌شود. این عمل باعث ایجاد کرنش کششی[۷] در سیلیکان می‌گردد. دراین کار، از شبیه سازی بوسیله TCAD برای تحقیق در مورد نتایج تئوری بهره‌گیری شده است و مدل‌ها، برمبنای آخرین مقالات در زمینه ویژگی‌های مواد موجود در قطعه، به روز شده است.

اختلاف سطوح انرژی سیلیکان کرنشی و SiGe ریلکس، باعث شکل‌گیری چاه کوانتومی[۸] در SiGe شده که درنقش کانال پارازیتی موازی با کانال اصلی ظاهر می‌گردد. هرچند وجود کانال موازی در ظاهر موجب افزایش جریان می‌گردد، اما این کانال باعث بالارفتن جریان نشتی و افزایش پارامتر مدولاسیون طول کانال(λ) و درنتیجه کاهش R_o می‌گردد که این به نوبه خود کاهش بهره را در پی خواهد داشت. درنتیجه هم به لحاظ عملکرد حالت DC و هم حالت AC ماسفت را با مشکل مواجه می‌کند.

برای حذف این کانال، ریم و همکارانش در [۷] روشی پیشنهاد داده‌اند که به موجب آن، سیلیکان کرنشی مستقیما روی SiGe ریلکس، رشد داده نمی‌شود، بلکه یک لایه‌ی SiGe با درصد ژرمانیم غیریکنواخت در بین این دو قرار داده می‌شود. درصد ژرمانیم این لایه، از میزان آن در SiGe ریلکس تا صفر تغییر می‌کند که موجب ایجاد کرنش در این لایه می‌گردد. با اینکه این روش باعث اصلاح کامل نوار انرژی و حذف کامل این کانال می‌گردد، اما مهم‌ترین عارضه‌ی این روش، افزایش ضخامت لایه‌ی کرنش یافته از ۱۵ نانومتر به بیش از ۴۵ نانومتر است که باعث می‌گردد علاوه بر پیچیده نمودن فرآیند ساخت و تحمیل هزینه، افزایش نقص در ساختار را درپی داشته باشد.

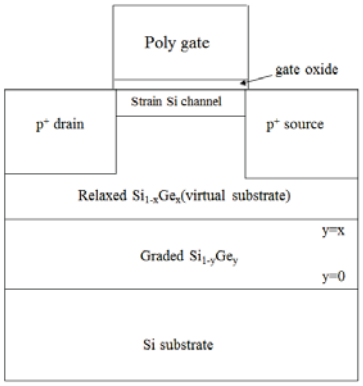
روش دیگری که توسط سوگی و همکارانش در [۸] پیشنهاد شده است، افزایش محلی دوپینگ قسمتی از کانال سیلیکان کششی در جهت حذف کانال پارازیتی است. مشکلات این روش، فرآیند پیچیده ساخت، افزایش نقص در کانال سیلیکانی، کاهش موبیلیتی موثر حفره و همچنین افزایش ولتاژ آستانه است.

دراینجا، برای اولین بار نشان داده می‌شود که می‌توان با مهندسی دوپینگ بستر مجازی، کانال پارازیتی را به طور کامل حذف نمود. نشان داده می‌شود این کار باعث بهبود پاسخ فرکانسی[۹]، [۱۰] و حصول قطعه PMOS با عملکرد متقارن قابل استفاده در ساختار وارونگر CMOS بدون افزایش نسبت عرض به طول کانال نسبت به NMOS [۱۱] می‌گردد.

۲- ساختار افزاره کرنشی دومحوره

ساختار افزاره تحت کرنش عمومی در شکل(۱)، نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، لایه‌ی بسیار نازکی از سیلیکان(۱۵ نانومتر) بر روی لایه‌ای از SiGe ضخیم(بستر مجازی[۹]) رشد داده شده است. طول کانال ۱۰۰ نانومتر و جهت کریستالی (001) است.

ثابت شبکه‌ی Ge به میزان ٪ ۴٫۲ بزرگ‌تر از ثابت شبکه‌ی سیلیکان است. به دلیل ضخامت زیاد لایه‌ی SiGe، این لایه به طور کامل ریلکس خواهد بود. برای جلوگیری از شکل‌گیری نقایص در لایه‌ی SiGe، از لایه‌ای با درصد ژرمانیم متغیر در میان SiGe و بستر سیلیکانی استفاده می‌شود. درصد ژرمانیم در نقطه تلاقی با سیلیکان بستر صفر درصد بوده و به تدریج به سمت درصد نهایی در لایه SiGe افزایش می‌یابد.



شکل(۱): ساختار ماسفت کرنشی دومحوره سیلیکانی

هنگام رشد لایه‌ی نازک از جنس سیلیکان روی SiGe ریلکس، پیوندی بین اتم‌های لایه‌ی Si با اتم‌های لایه‌ی زیرین تشکیل می‌شود که باعث می‌گردد، لایه‌ی Si خود را با لایه SiGe تطبیق دهد. این موضوع، باعث ایجاد کشش به میزان ٪ ۴٫۲x در این لایه می‌گردد که x کسر مولی[۱۰] ژرمانیم در SiGe است.[۱۲]

در این مقاله، برای کاهش اندازه‌ی ولتاژ آستانه، گیت از نوع پلی سیلیکان نوع p انتخاب شده است. اکسید گیت از جنس SiO_2 به

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.4.5.5]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.4- Winter 2016

ضخامت ۴ نانومتر، طول کانال برابر ۱۰۰ نانومتر و کسر مولی ژرمانیم در SiGe برابر ۰٫۳ در نظر گرفته شده است. تمام شبیه‌سازی‌ها و پارامترهای موجود در مقاله متعلق به دمای اتاق است.

۳- بررسی تئوری

در این قسمت، موقعیت کانال پارازیتی بازای دوپینگ‌های مختلف SiGe مورد بررسی قرار می‌گیرد تا نقش دوپینگ بستر مجازی معین گردد. برای این هدف، باید مشخصات لایه‌های تشکیل دهنده‌ی ماسفت مشخص گردند.

۳-۱- مشخصات لایه ها

در این قسمت مشخصات لایه های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکاف انرژی[۱۱] سیلیکان کششی از شکاف انرژی سیلیکان ریلکس، کمتر است. مطابق [۱۳] شکاف انرژی سیلیکان کششی از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$E_{gss} = 1.084 - x(0.31 + 0.53x) \qquad (۱)$$

اندیس ss مخفف strained Si است. لازم به ذکر است که در تمام روابط، x کسر مولی ژرمانیم لایه‌ی SiGe ریلکس است. همچنین الکترون-خواهی[۱۲] سیلیکان کششی از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید[۱۳]:

$$\chi_{ss} = 4.05 + 0.58x \ \text{eV} \qquad (۲)$$

ثابت گذردهی نسبی سیلیکان کششی، برابر سیلیکان ریلکس و برابر ۱۱٫۹ است و ثابت گذردهی نسبی SiGe از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید[۱۳]:

$$\varepsilon_{SiGe}(x) = 11.9 + 4.1x \qquad (۳)$$

SiGe نسبت به سیلیکان، شکاف انرژی کم‌تری دارد که از رابطه زیر بدست می‌آید[۱۳]:

$$E_G(Si_{1-x}Ge_x) = 1.084 - 0.42x \ \text{eV} \qquad (۴)$$

همچنین الکترون-خواهی SiGe برابر است با [۱۳]:

$$\chi(Si_{1-x}Ge_x) = 4.05 - 0.05x \ \text{eV} \qquad (۵)$$

از طرف دیگر پارامترهای پلی سیلیکان، نظیر شکاف انرژی و الکترون-خواهی مانند سیلیکان است. [۱۴]

۳-۲- چگالی موثر حالات

در تحلیل و شبیه سازی، مقدار چگالی حامل های ذاتی باید مشخص گردد که طبق [۱۵] از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$n_{iss} = \sqrt{N_{Css}N_{Vss}}\exp\left(-\frac{E_{gss}}{2kT}\right) \qquad (۶)$$

در اینجا T دما و k ثابت بولتزمن است. درنتیجه باید مقدار چگالی موثر حالات[۱۳] (N_{Css} و N_{Vss}) در نوار انرژی هدایت و ظرفیت مشخص شود که از روابط زیر محاسبه می‌گردند[۱۵]:

$$N_{Css} = 2\left(\frac{2\pi m_{ed(ss)}kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \qquad (۷)$$

و

$$N_{Vss} = 2\left(\frac{2\pi m_{hd(ss)}kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \qquad (۸)$$

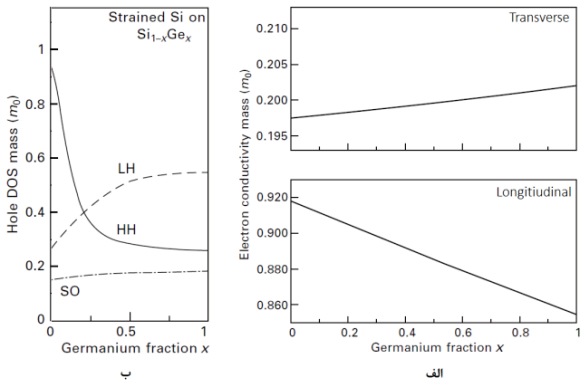
در این روابط h ثابت پلانک و $m_{ed(ss)}$ و $m_{hd(ss)}$ به ترتیب جرم موثر الکترون‌ها و حفره‌ها هستند و باتوجه به [۱۶] به صورت زیر محاسبه می‌گردند:

$$m_{ed(ss)} = \left[2(m_{le(ss)}m_{te}^2)^{\frac{1}{2}} + 4(m_{le(ss)}m_{te}^2)^{\frac{1}{2}}\exp\left(\frac{-\Delta E_{csplit}}{kT}\right)\right] \qquad (۹)$$

و

$$m_{hd(ss)} = \left(m_{lh(ss)}^{\frac{3}{2}} + m_{hh(ss)}^{\frac{3}{2}}\right)^{\frac{2}{3}} \qquad (۱۰)$$

دراین روابط، $m_{le(ss)}$ و $m_{te(ss)}$ به ترتیب مولفه‌های جرم موثر الکترون در راستای طولی[۱۴] و عرضی[۱۵] و $m_{lh(ss)}$ و $m_{hh(ss)}$ جرم موثر حفره‌های سبک و سنگین هستند. شکل (۲-الف) مقادیر مربوط به الکترون و شکل (۲-ب) مقادیر مربوط به حفره را نمایش می‌دهد.



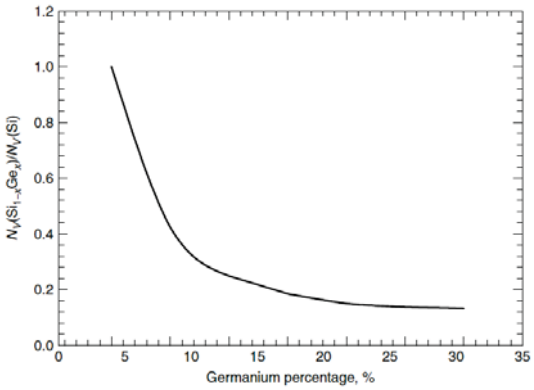
شکل (۲): جرم موثر حفره و الکترون در سیلیکان کرنشی برحسب کسر مولی ژرمانیم بستر مجازی در دمای اتاق الف) جرم موثر الکترون در راستای طولی و عرضی ب)جرم موثر حفره سبک، سنگین و چرخش اسپینی[۱۶] [۶]، [۱۷]

همچنین ΔE_{csplit}، میزان جداسازی انرژی دره های Δ_2 و Δ_4 است، طبق [۱۲] به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\Delta E_{csplit} = 0.67x \ \text{eV} \qquad (۱۱)$$

چگالی موثر حالات نوار هدایت در SiGe ریلکس، تقریبا برابر سیلیکان بوده [۱۸] و نسبت چگالی موثر حالات نوار ظرفیت SiGe نسبت به سیلیکان مطابق شکل (۳)، خواهد بود.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.4.5.5]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.4-Winter 2016



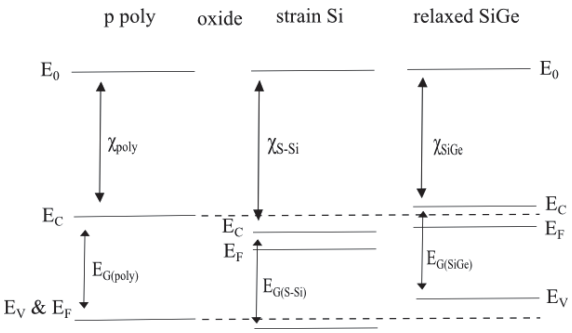
شکل (۳): نسبت چگالی موثر حالات نوار ظرفیت SiGe به سیلیکان [۱۸]

۳-۳- ساختار نوارهای انرژی در افزاره

در شکل (۴) ساختار نوار انرژی سه لایه‌ی مهم ماسفت یعنی گیت از نوع پلی سیلیکان، سیلیکان کششی و SiGe مشاهده می‌شوند. درهنگام اتصال این نواحی به هم، با توجه به اختلاف سطح انرژی باند هدایت و ظرفیت بین سیلیکان کششی و SiGe، گسستگی نوار انرژی در نقطه‌ی اتصال این دو، مورد انتظار است. همچنین به علت تفاوت در سطح فرمی این سه لایه، خمش نوار انرژی[۱۷] در نزدیکی اتصال هر دو لایه اتفاق خواهد افتاد. میزان این خمش بستگی به سطوح فرمی نواحی مختلف دارد که تابعی از میزان و نوع دوپینگ هر قسمت است و برای نوع n از رابطه زیر مشخص می‌گردد:

$$E_C - E_F = kT \ln \frac{N_C}{N_D} \qquad (۱۲)$$

که در این رابطه N_D میزان ناخالصی دهنده است.



شکل (۴): ساختار نوار انرژی لایه‌های ماسفت سیلیکانی کششی دومحوره قبل از اتصال به هم

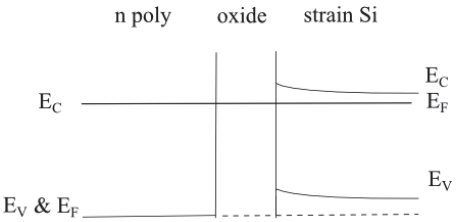
سطح فرمی پلی سیلیکان نوع p، با توجه به آلایش بسیار بالای آن، منطبق بر E_V است[۱۹]. ازطرف دیگر، کشش باعث افزایش الکترون-خواهی و کاهش شکاف انرژی سیلیکان می‌گردد. درنتیجه لایه‌ی ظرفیت(E_V) سیلیکان کششی در تراز پایین‌تری نسبت به سیلیکان قرار می‌گیرد.

شکاف‌انرژی SiGe بنا به معادلات حاکم بر آن، درحدود سیلیکان کششی و کمتر از سیلیکان عادی خواهد بود. الکترون-خواهی آن نیز اندکی کمتر از سیلیکان معمول می‌باشد. دوپینگ آن نیز مانند سیلیکان کششی نوع n خواهد بود. تفاوت سطوح فرمی سیلیکان کششی و SiGe بستگی به میزان دوپینگ آن دو می‌تواند در یکی بالاتر از دیگری باشد.

در حالت تعادل[۱۸]، با توجه به اینکه سطح فرمی در پلی سیلیکان نوع p پایین‌تر از سیلیکان کرنش یافته است، گروهی از الکترون‌های سیلیکان نزدیک سطح تماس این دولایه، از طریق مدار خارجی یا جریان نشتی تخلیه شده و درنتیجه سطح سیلیکان کششی نزدیک به پلی، دارای بار مثبت خواهد بود. درنتیجه میدانی از سمت سیلیکان به سمت پلی برقرار می‌گردد. برای محاسبه میزان خمش سطوح انرژی، رابطه‌ی زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$\vec{E} = \frac{1}{q}\frac{dE_i}{dx} \qquad (۱۳)$$

که نشان می‌دهد خمش نوار انرژی با میزان میدان الکتریکی متناسب است[۱۴]. درنتیجه، دراینجا میدان الکتریکی موجب خمش سطوح انرژی با شیب منفی می‌گردد که در شکل (۵) نشان داده شده است. وجود این خمش، باعث می‌گردد حفره‌های سیلیکان کششی در سطح نزدیک به پلی جریان یابند؛ اگرچه بدلیل فاصله‌ی بین پلی و سیلیکان، این شیب کم خواهد بود.



شکل (۵): نحوه تغییرات سطوح انرژی سیلیکان کششی بعد از برقراری تماس از طریق اکسید با پلی سیلیکان نوع p به عنوان گیت

۴-۳- تحلیل نقش دوپینگ SiGe بر کانال پارازیتی

در اینجا همزمان با نشان دادن علت وجود کانال پارازیتی، نحوه تاثیر دوپینگ بستر مجازی بر کاهش نقش این کانال، مورد بررسی قرار می‌گیرد. دراین بررسی‌ها، دوپینگ کانال برابر $۴\times۱۰^{۱۷}\ cm^{-3}$ و شرایط دمای اتاق، درنظر گرفته می‌شود.

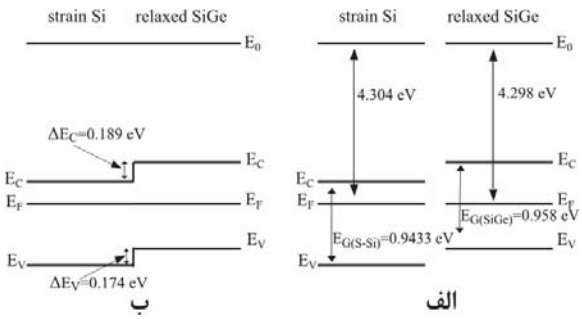
حالت اول- دوپینگ بستر مجازی، خیلی کمتر از دوپینگ کانال سیلیکانی کششی، $۴\times۱۰^{۱۵}\ cm^{-3}$.

در این حالت:

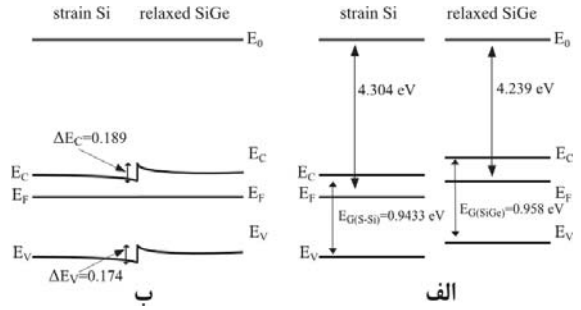
$$[\chi + (E_C - E_F)]_{S-Si} \approx [\chi + (E_C - E_F)]_{SiGe}$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.4.5.5]

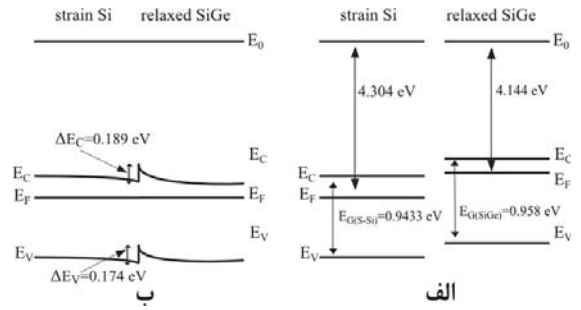
وضعیت نوارهای انرژی قبل از پیوند مطابق شکل (۶-الف) و بعد از پیوند، به صورت شکل (۶-ب) می‌باشد. سطح نوار ظرفیت در SiGe بالاتر از سیلیکان کششی است. حفره‌ها، تمایل به پرکردن انرژی‌های بالاتر را دارند؛ درنتیجه SiGe برای حفره‌ها، به عنوان چاه کوانتومی عمل می‌کند. این موضوع سبب می‌گردد حفره‌ها به سمت SiGe سرازیر گردند و درنتیجه باعث ایجاد کانال پارازیتی در ماسفت گردند. تجمع زیاد حفره‌ها در این محدوده باعث کاهش مقاومت آن و درنتیجه افزایش جریان حالت خاموش می‌گردد.



شکل (۶): ساختار باندهای انرژی پیوند سیلیکان کششی و SiGe برای حالت اول($۴\times۱۰^{۱۵}\ cm^{-3}$)



شکل (۷): ساختار باندهای انرژی پیوند سیلیکان کششی و SiGe برای حالت دوم($۴\times۱۰^{۱۶}\ cm^{-3}$)



شکل (۸): ساختار باندهای انرژی پیوند سیلیکان کششی و SiGe برای حالت سوم($۴\times۱۰^{۱۷}\ cm^{-3}$)

حالت دوم- دوپینگ بستر مجازی، کمتر از دوپینگ کانال سیلیکانی کششی، $۴\times۱۰^{۱۶}\ cm^{-3}$.

در این حالت:

$$[\chi+(E_C-E_F)]_{S-Si}>[\chi+(E_C-E_F)]_{SiGe}$$

به نظر می‌رسد، وضعیت نوارهای انرژی مطابق شکل (۷-الف) باشد و با اتصال به هم، به صورت شکل (۷-ب) درآید. مشاهده می‌شود چاه کوانتومی نسبت به حالت قبل محدودتر شده است.

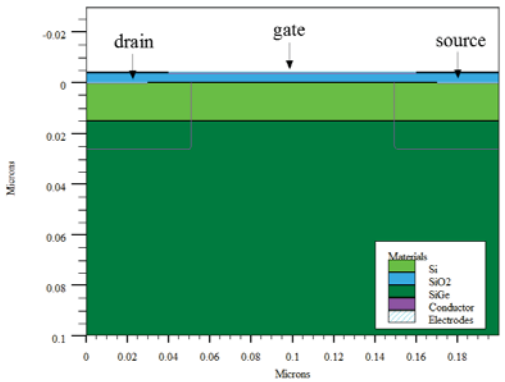
حالت سوم- دوپینگ بستر مجازی برابر دوپینگ کانال، $۴\times۱۰^{۱۷}\ cm^{-3}$.

در این حالت نیز:

$$[\chi+(E_C-E_F)]_{S-Si}>[\chi+(E_C-E_F)]_{SiGe}$$

بنابراین، وضعیت نوارهای انرژی مطابق شکل (۸-الف) بوده و با اتصال به هم به صورت شکل (۸-ب) درمی‌آید. این شکل باز هم محدود شدن چاه کوانتومی را نشان می‌دهد.

با مقایسه‌ی این حالات، نتیجه مهمی حاصل می‌شود که با افزایش دوپینگ بستر مجازی، به ازای دوپینگ ثابت کانال، عرض چاه کوانتومی کاهش می‌یابد. این کاهش عرض، باعث کاهش تعداد و تغییر سطح نوارهای انرژی می‌شود که به نوبه‌ی خود، جریان گذرنده از این کانال پارازیتی را کاهش داده و این کاهش می‌تواند تا حد قابل ملاحظه ای منجر به حذف این کانال گردد.



شکل (۹): سطح مقطع افزاره نانو ماسفت نوع p کرنشی دو محوره

۴- شبیه سازی

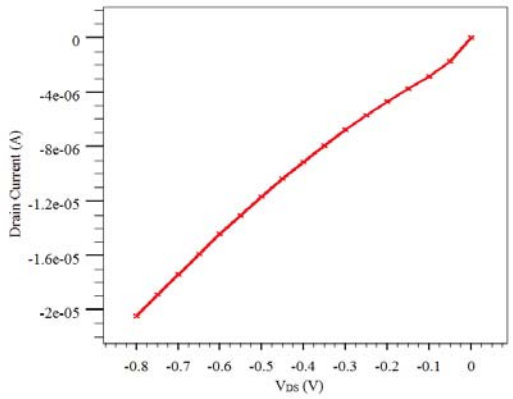
شکل (۹)، سطح مقطع افزاره نانوماسفت نوع p را به تفکیک سه لایه تا عمق ۱۰۰ نانومتر نشان می‌دهد. در این قسمت نتایج شبیه سازی چگالی جریان عبوری از افزاره بازای دوپینگ‌های مختلف زیرلایه مجازی ارایه می شود.

۴-۱- جریان حالت خاموش

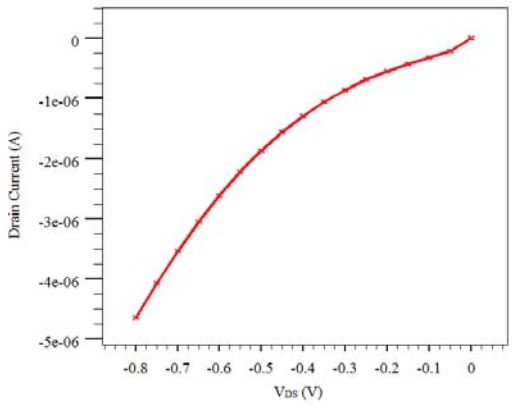
حالت اول- دوپینگ بستر مجازی $۴\times۱۰^{۱۵}\ cm^{-3}$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.4.5.5]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.4-Winter 2016

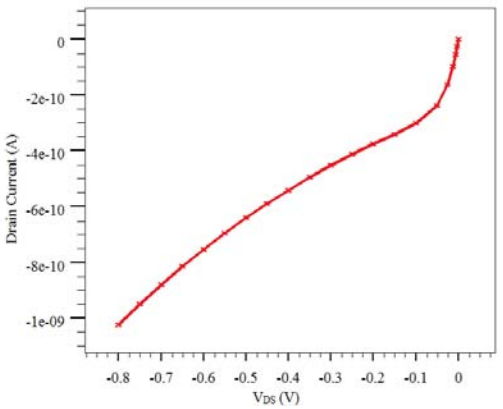
برای اینکار، V_{SG} برابر صفر و ولتاژ V_{SD} از صفر تا ۰٫۸ V تغییر می‌کند. مطابق شکل (۱۰) مقدار جریان درین تا حدود $۲۰\mu A$ افزایش می‌یابد. این افزایش به ازای افزایش V_{SD}، دارای رشد تقریبا خطی می‌باشد. این جریان تحت کنترل V_{SG} نیست و درنتیجه تنها باعث دورشدن ماسفت از شرایط ایده آل می‌گردد.



شکل (۱۰): جریان حالت خاموش ماسفت در حالت اول دوپینگ
$۴\times۱۰^{۱۵}\ cm^{-3}$

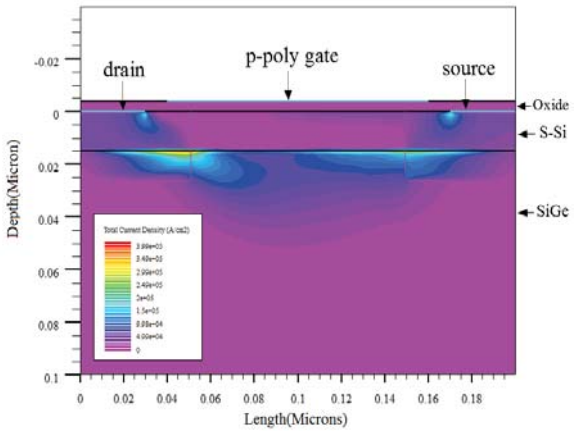


شکل (۱۱): جریان حالت خاموش ماسفت در حالت دوم دوپینگ
$۴\times۱۰^{۱۶}\ cm^{-3}$

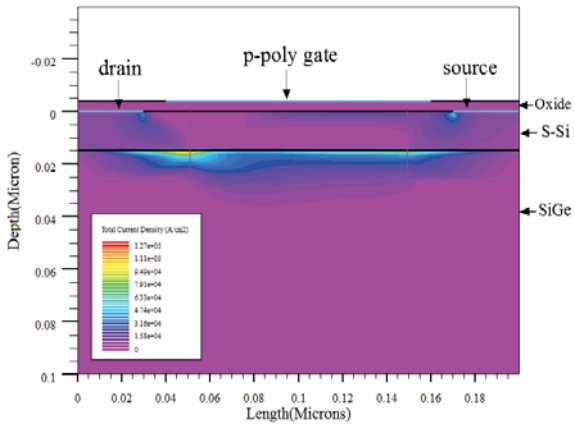


شکل (۱۲): جریان حالت خاموش ماسفت در حالت سوم دوپینگ
$۴\times۱۰^{۱۷}\ cm^{-3}$

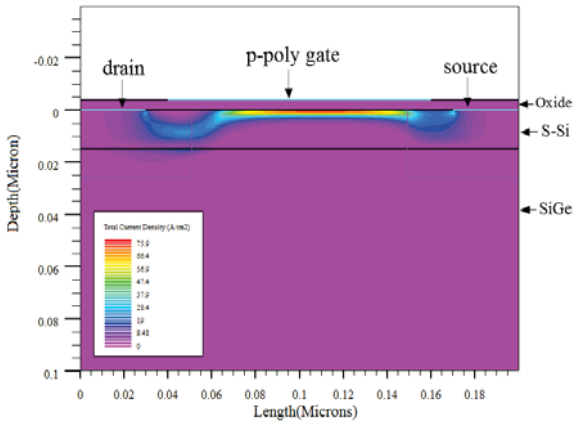
شکل (۱۳)، چگالی جریان عبوری را بازای V_{SD}= ۰٫۸ V در ساختار قطعه نشان می‌دهد. همانطورکه مشاهده می‌شود، بستر مجازی به عنوان چاه کوانتومی عمل کرده و جریان را از خود عبور می‌دهد.



شکل (۱۳): چگالی جریان عبوری از ماسفت در حالت اول دوپینگ $۴\times۱۰^{۱۵}\ cm^{-3}$



شکل (۱۴): چگالی جریان عبوری از ماسفت در حالت دوم دوپینگ
$۴\times۱۰^{۱۶}\ cm^{-3}$



شکل (۱۵): چگالی جریان گذرنده در حالت سوم دوپینگ
$۴\times۱۰^{۱۷}\ cm^{-3}$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.4.5.5]

حالت دوم- دوپینگ بستر مجازی: $۴\times۱۰^{۱۶}\ cm^{-3}$

همانطور که در بخش قبل بحث شد، انتظار می‌رود دراین حالت، چاه کوانتومی کمی محدود شود و جریان گذرنده از آن کاهش یابد. طبق شکل (۱۱)، جریان حداکثر به میزان $۴/۶\ \mu A$ می‌رسد که کمتر از حالت قبل است. با این وجود، مطابق شکل (۱۴) (چگالی جریان عبوری بازای $V_{SD}=۰/۸\ V$)، همچنان کانال پارازیتی، نقش زیادی در عبور جریان دارد.

حالت سوم- دوپینگ بستر مجازی: $۴\times۱۰^{۱۷}\ cm^{-3}$

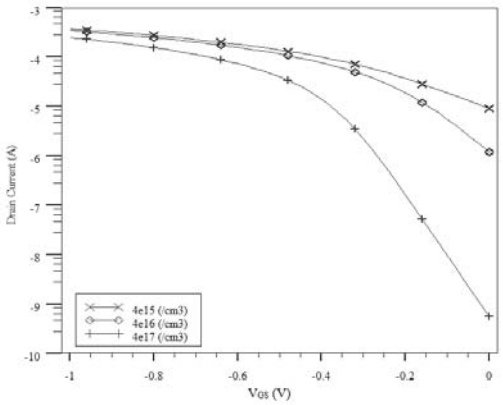
مطابق شکل (۱۲) برای نمودار جریان برحسب V_{SD}، مشاهده می‌شود که طبق انتظار، جریان کاهش یافته و حداکثر به $۱\ nA$ می‌رسد. همانطور که شکل (۱۵)(چگالی جریان عبوری از قطعه بازای $V_{SD}=۰/۸\ V$) نشان می‌دهد، چاه کوانتومی به طور کامل حذف گردیده است.

جمع بندی نتایج سه حالت در جدول (۱) مشاهده می‌شود و بر اساس این نتایج، بستگی جریان حالت خاموش به ناخالصی بستر مجازی ملاحظه می‌شود.

جدول (۱): بستگی جریان حالت خاموش به دوپینگ بستر مجازی

حالت	دوپینگ SiGe	حداکثر جریان	ضریب کاهش نسبت به حالت اول
۱	$۴\times۱۰^{۱۵}\ cm^{-3}$	$۲۰\ \mu A$	۱
۲	$۴\times۱۰^{۱۶}\ cm^{-3}$	$۴/۶\ \mu A$	۰/۲۳
۳	$۴\times۱۰^{۱۷}\ cm^{-3}$	$۱\ nA$	۵×۱۰^{-۵}

نمودار لگاریتمی جریان درین برحسب V_{GS} بازای $V_{SD}=۰/۴\ V$ در شکل (۱۶) رسم شده است. مشاهده می‌شود، با حذف کانال پارازیتی جریان خاموش و زیر آستانه کاهش محسوسی خواهد یافت.

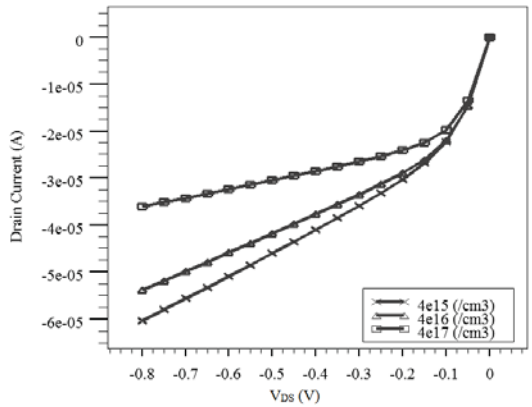


شکل (۱۶): جریان ماسفت برای دوپینگ های مختلف SiGe بر حسب V_{GS} بازای $V_{SD}=۰/۴\ V$

لازم به ذکر است هرروشی، همزمان با بهبود مشخصات، می‌تواند عوارضی نیز به همراه داشته باشد. مهم‌ترین عیب این روش، بالا بردن ولتاژ آستانه است. بسته به میزان تغییر دوپینگ بستر از حالت اول به حالت سوم، حداکثر ۰/۱ V به ولتاژ آستانه اضافه می‌گردد که این میزان، درمقایسه با بهبود مشخصات، قابل صرف نظر کردن است. علت کاهش جریان در حالت روشن با افزایش دوپینگ SiGe، مطابق شکل (۱۶)، نیز همین پدیده است.

۴-۲- مقاومت خروجی ماسفت

مقاومت کانال در این نوع ماسفت حاصل ترکیب موازی دو مقاومت کانال اصلی در سیلیکان کرنشی (R_m) و مقاومت ناشی از کانال پارازیتی در SiGe (R_p) است. در دوپینگ های اندک SiGe، مقاومت کانال پارازیتی، مقداری بسیار کمی است و مقاومت کل (R_o) را تعیین می‌کند. با حذف تدریجی کانال پارازیتی مقدار مقاومت آن افزایش می‌یابد و در نتیجه مقدار مقاومت کل نیز افزایش خواهد یافت. تغییرات جریان ماسفت بر حسب V_{DS} را برای دوپینگ های مختلف SiGe نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود، با افزایش دوپینگ و حذف کانال پارازیتی، شیب نمودار کاهش یافته و در نتیجه، پارامتر مدولاسیون طول کانال (λ)، براساس جدول (۲)، کاهش می‌یابد و این موجب افزایش R_o و بهبود بهره خواهد گردید.



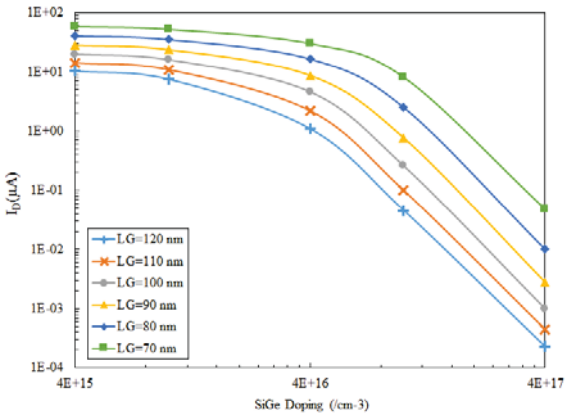
شکل (۱۷): جریان ماسفت برحسب V_{DS} ماسفت برای دوپینگ های مختلف SiGe بازای $V_{GS}-V_{th}=-۰/۲\ V$

جدول (۲): بستگی پارامتر مدولاسیون طول کانال به دوپینگ بستر مجازی

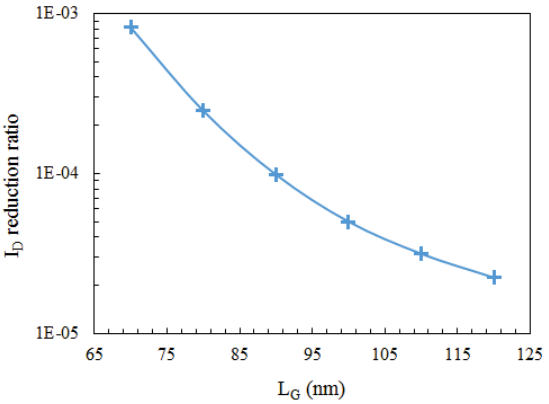
حالت	دوپینگ SiGe	$\lambda\ (V^{-1})$
۱	$۴\times۱۰^{۱۵}\ cm^{-3}$	۰/۴۷۳
۲	$۴\times۱۰^{۱۶}\ cm^{-3}$	۰/۴۶۷
۳	$۴\times۱۰^{۱۷}\ cm^{-3}$	۰/۳۵۷

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.4.5.5]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.4-Winter 2016

نتایج تحلیل های ارائه شده، در طول های مختلف کانال صادق است و نشان داده می‌شود، افزایش دوپینگ SiGe، منجر به حذف تدریجی کانال پارازیتی و کاهش جریان خاموش ماسفت می‌گردد(شکل (۱۸). شکل (۱۹) نسبت کاهش جریان ماسفت(نسبت جریان ماسفت در دوپینگ $۴\times۱۰^{۱۷}\ cm^{-3}$ به جریان در $۴\times۱۰^{۱۵}\ cm^{-3}$ بازای V_{SD} = ۰٫۸ V) را برحسب طول کانال نشان می‌دهد. در طول کانال های بزرگ R_m مقدار بسیار بزرگی نسبت به R_p است. در نتیجه انتظار داریم با افزایش دوپینگ SiGe و حذف کانال پارازیتی، مقدار تفاوت زیادی را احساس کنیم. حال آنکه در کانال‌های کوچک، مقدار R_m مقداری کوچک است و با حذف کانال پارازیتی و غالب شدن این مقاومت در مقدار R_o همچنان مقدار مقاومت کوچک باقی خواهد ماند. بنابراین انتظار می‌رود، در کانال‌های بزرگ، کاهش جریان بیش‌تری را نسبت به کانال کوچک اتفاق افتد.



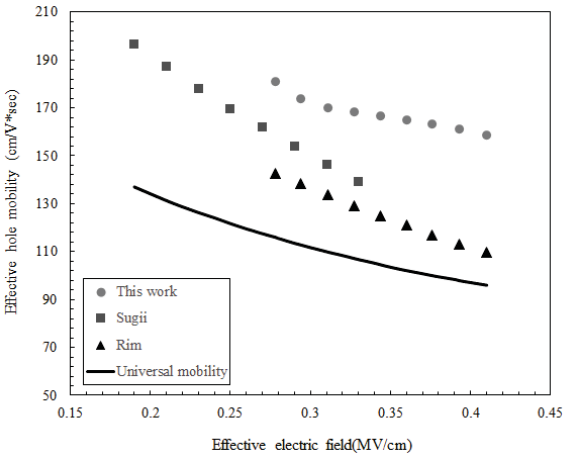
شکل (۱۸): جریان ماسفت برحسب دوپینگ SiGe بازای V_{SD} = ۰٫۸ V برای طول های مختلف کانال



شکل (۱۹): ضریب کاهش جریان ماسفت با افزایش دوپینگ SiGe از $۴\times۱۰^{۱۵}\ cm^{-3}$ به $۴\times۱۰^{۱۷}\ cm^{-3}$ برحسب طول کانال بازای V_{SD} = ۰٫۸ V

۴-۳- موبیلیتی

تاثیر تغییر ناخالصی بستر مجازی روی موبیلیتی موثر نیز مطابق شکل (۲۰) مورد بررسی قرار گرفته است. محاسبه‌ی موبیلیتی در حالت‌های اول و دوم، به علت نقش زیاد کانال پارازیتی در انتقال جریان، مقادیر مفیدی به دست نمی‌دهد. بنابراین تنها در حالت سوم این بررسی انجام گرفته است. ضمنا با توجه به [۲۰] در میدان‌های کمتر از ۰٫۵ MV/cm، اثر پراکندگی سطحی[۱۹] قابل صرف نظر بوده که در اینجا نیز در نظر گرفته نشده است.



شکل (۲۰): مقایسه موبیلیتی موثر حفره در حالت سوم این کار (دوپینگ $۴\times۱۰^{۱۷}\ cm^{-3}$) با کار ارایه شده توسط سوگی[۸] و موبیلیتی موثر حفره درماسفت با کانال سیلیکونی غیرکرنشی [۲۱]

مطابق شکل (۲۰) مشاهده می‌شود چون کانال اصلی از داخل سیلیکان تحت کرنش عبور می‌کند، موبیلیتی نسبت به ماسفت سیلیکونی معمول افزایش می‌یابد و نسبت به کار سوگی و همکاران [۸] نیز موبیلیتی بهتر است. در کار سوگی، با اینکه کسر مولی ژرمانیم بستر مجازی، همانند اینکار ۰٫۳ درنظر گرفته شده است، موبیلیتی کمتری گزارش شده است. اولین علت اینست که بستر مجازی به میزان ۸۶ درصد ریلکس است و درنتیجه کشش کمتری به وقوع می‌پیوندد. دومین علت افزایش نقایص ناشی از تغییرات شدید دوپینگ در درون سیلیکان کششی(کانال) است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، جریان حالت خاموش در افزاره‌ی نانوماسفت کرنشی دو محوره مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که دوپینگ بستر مجازی نقش تعیین کننده‌ای در تشکیل و ساختار چاه کوانتومی در مرز ناحیه سیلیکان و SiGe دارد و می‌توان با افزایش آن، کانال پارازیتی را حذف نمود و جریان حالت خاموش را بیش از $۱۰^{-۴}$ برابرکمتر کرد. همچنین مشاهده گردید افزایش دوپینگ SiGe باعث کاهش پارامتر مدولاسیون

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.4.5.5]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.4- Winter 2016

طول کانال و بهبود موبیلیتی می‌گردد. همچنین نشان داده شد که این روش در طول های مختلف کانال برقرار است. درنتیجه بدون افزایش ضخامت SiGe، می‌توان عملکرد ماسفت را بهبود بخشید.

سپاسگزاری

دراین قسمت برخود لازم می‌دانیم از مرحوم دکتر سعید خاتمی یادنماییم که محرک و مشوق پژوهش در حوزه‌ی قطعات نیمه هادی در دانشکده برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر بوده‌اند.

مراجع

[۱] ن. قبادی، ع. افضلی کوشا، "بررسی و مدل سازی اثر ناپایداری در دمای بالا و بایاس منفی (NBTI) و تزریق حامل های پرانرژی (HCL) در افزاره های چندگیتی نانومتری،" 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] S. L. Braunstein, "Quantum Computation," York, Apr. 2003.

[4] Viktor Sverdlov, Strain-Induced Effects in Advanced MOSFETs. Springer, 2011.

[5] X. Sun, J. Liu, L. C. Kimerling, and J. Michel, "Direct gap photoluminescence of n-type tensile-strained Ge-on-Si," Appl. Phys. Lett., vol. 95, p. (011911-)1-3, 2009.

[6] Y. Shiraki and N. Usami, Eds., Silicon-germanium (SiGe) nanostructures. Woodhead, 2011.

[7] K. Rim, J. L. Hoyt, and J. F. Gibbons, "Enhanced Hole Mobilities in Surface-channel Strained-Si p-MOSFETs," in IEEE International Electron Devices Meeting(IEDM), 1995, pp. 517–520.

[8] N. Sugii, S. Yamaguchi, and K. Nakagawa, "Elimination of parasitic channels in strained-Si p-channel metal-oxide-semiconductor field- effect transistors," Semicond. Sci. Technol., vol. 16, pp. 155–159, 2001.

[9] M. M. Khatami, M. Shalchian, and M. Kolahdouz, "Impacts of virtual substrate doping on high frequency characteristics of biaxially strained Si PMOSFET," Superlattices Microstruct., vol. 85, pp. 82–91, 2015.

[10] M. M. Khatami, M. Shalchian, and M. Kolahdouz, "Reducing parasitic capacitance of strained Si nano p-MOSFET by control of virtual substrate doping," in 5th International Congress on Nanoscience and Nanotechnology(ICNN2014), 2014, pp. 247–250.

[11] Mohammad Mahdi Khatami, Majid Shalchian, and Mohammadreza Kolahdouz, "A symmetric CMOS inverter using biaxially strained Si nano PMOSFET," in 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2015, pp. 1282–1285.

[12] J. Cressler, Ed., Silicon heterostructure devices. Taylor & Francis, 2010.

[13] H. M. Nayfeh, J. L. Hoyt, and D. A. Antoniadis, "A Physically Based Analytical Model for the Threshold Voltage of Strained-Si n-MOSFETs," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 51, no. 12, pp. 2069–2072, 2004.

[14] S. Sze and K. Ng, Physics of semiconductor devices, 3rd ed. Wiley, 2007.

[15] R. Pierret and G. Neudeck, Semiconductor fundamentals. addison-wesley, 1983.

[16] A. Biswas and S. Bhattacherjee, "Temperature dependent model for threshold voltage and subthreshold slope of strained-Si channel MOSFETs with a polysilicon gate," Microelectron. Reliab., pp. 5–7, Apr. 2014.

[17] S. Richard, N. Cavassilas, F. Aniel, and G. Fishman, "Strained silicon on SiGe: Temperature dependence of carrier effective masses," J. Appl. Phys., vol. 94, no. 8, pp. 5088–5094, 2003.

[18] Peter Ashburn, SiGe Heterojunction Bipolar Transistors. John Wiley & Sons, 2003.

[19] Robert F. Pierret, Field effect devices, 2nd ed. Addison-Wesley, 1990.

[20] S. Takagi, J. L. Hoyt, J. J. Welser, and J. F. Gibbons, "Comparative study of phonon-limited mobility of two-dimensional electrons in strained and unstrained Si metal–oxide–semiconductor field-effect transistors," J. Appl. Phys., vol. 80, no. 3, pp. 1567–1577, 1996.

[21] S. Takagi, A. Toriumi, M. Iwase, and H. Tango, "On the Universality of Inversion Layer Mobility in Si MOSFET ' s : Part I-Effects of Substrate Impurity Concentration," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 41, no. 12, pp. 2357–2362, 1994.

زیرنویس‌ها

[1] Moore
[2] Strain
[3] Stress
[4] Biaxial
[5] Uniaxial
[6] Relax
[7] Tensile
[8] Quantum well
[9] Virtual substrate
[10] Mole fraction
[11] Band gap
[12] Electron affinity
[13] Effective density of states
[14] Longitudinal
[15] Transverse
[16] Spin orbit
[17] Band bending
[18] Equilibrium
[19] Surface scattering

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.4.5.5]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.4-Winter 2016