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

محمدمهدی خاتمی مجید شالچیان محمدرضا کلاهدوز آ ۱ - دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تربیت مدرس - تهران - ایران <u>mmkhatami@aut.ac.ir</u> ۲ - استادیار - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - تهران - ایران <u>shalchian@aut.ac.ir</u> ۳ - استادیار - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تهران - تهران - ایران <u>kolahdouz@ut.ac.ir</u>

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 5^{-c} cm⁻³، ضمن تشکیل کانال با موبیلیتی موثر بالا، جریان حالت خاموش تا بیش از ^{۴-1} برابر کاهش مییابد. این روش در طول کانالهای مختلف موثر بوده و همچنین باعث بهبود مقاومت خروجی ماسفت می-گردد.

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

- تاريخ ارسال مقاله : ١٣٩٣/٥/٢۶
- تاريخ پذيرش مشروط مقاله: ١٣٩٥/۴/١٣
 - 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

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.4-Winter 20

۱- مقدمه

مور در سال ۱۹۶۵ پیش بینی کرد هـ ۱۸ مـاه تعـداد قطعـات نیمـه هادی مجتمع سازی شده، بر واحد سطح دوبرابر می شود. این پیش بينى تاكنون به طرز حيرت آورى به وقوع پيوسته است. اما اكنون، اين 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 ارزان تر بودن نسبت به نیمه هادی های 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 از طریق اعمال تنش بر ساختار شبکه سیلیکان است. اولین مورد، برمبنای ایجاد کرنش شبکه سیلیکان در دومحور [†] 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 ریلکس²رشد داده می شود. این عمل باعث ایجاد کرنش کششی^۷ در سیلیکان می-گردد. دراین کار، از شبیه سازی بوسیله TCAD برای تحقیق در مورد نتایج تئوری بهره گیری 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 شکل گیری چاه کوانتومی^۸ در SiGe شده که درنقے کانال پارازیتی موازی با کانال اصلی ظاهر می گردد. هرچند وجود کانال موازی در ظاهر موجب افزایش جریان می گردد، اما این کانال باعث بالارفتن جریان نشتی و افزایش پارامتر مدولاسیون طول کانال(λ) و درنتیجـه کاهش R_o می گردد که این به نوبه خود کاهش بهره را در پی خواهـد داشت. درنتيجه هم به لحاظ عملكرد حالت DC و هم حالت AC ماسفت را با مشکل مواجه می کند.

برای حذف این کانال، ریم و همکارانش در [۷] روشی پیشنهاد دادهاند که به موجب آن، سیلیکان کرنشی مستقیما روی SiGe ریلکس، رشد داده نمی شود، بلکه یک لایهی SiGe با درصد ژرمانیم غیریکنواخت در بین این دو قرار داده می شود. درصد ژرمانیم این لایه، از میزان آن در SiGe ریلکس تا صفر تغییر میکند که موجب ایجاد کرنش در این لایه می گردد. با اینکه این روش باعث اصلاح کامل نوار انرژی و حذف کامل این کانال می گردد، اما مهم ترین عارضهی این روش، افزایش ضخامت لایهی کرنش یافته از ۱۵ نانومتر به بیش از ۴۵ نانومتر است که باعث می گردد علاوه بر پیچیده نمودن فرآیند ساخت و تحمیل هزینه، افزایش نقص در ساختار را در پی 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 كانال يارازيتي است. مشكلات اين روش، فرآيند پيچيده ساخت، افزایش نقص در کانال سیلیکانی، کاهش موبیلیتی موثر حفره و همچنین افزایش ولتاژ آستانه است.

دراینجا، برای اولین بار نشان داده می شود که می توان با مهندسی دوپینگ بستر مجازی، کانال پارازیتی را به طور کامل حذف نمود. نشان داده می شود 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] می گردد.

۲- ساختار افزاره کرنشی دومحوره

ساختار افزاره تحت کرنش عمومی در شکل(۱)، نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود، لایه ی بسیار ناز کی از سیلیکان(۱۵ نانومتر) بر روی لایهای از SiGe ضخیم(بستر مجازی^۱) 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 شکل گیری نقایص در لایه-ی SiGe، از لایهای با درصد ژرمانیم متغیر در میان SiGe و بستر سیلیکانی استفاده می شود. در صد ژرمانیم در نقطه تلاقی با سیلیکان بستر صفر درصد بوده و به تدریج به سمت درصد نهایی در لایه SiGe افزايش مي يابد.



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 می شود که باعث می گردد، لایهی Si خود را با لایه SiGe تطبیق دهد. این x موضوع، باعث ایجاد کشش به میزان / K K در این لایه می گردد که کسر مولی^۱ 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 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 یارامترهای موجود در مقاله متعلق به دمای اتاق است.

۳- بررسی تئوری

در این قسمت، موقعیت کانال پارازیتی بازای دوپینگ های مختلف SiGe مورد بررسی قرار می گیرد تا نقش دوپینگ بستر مجازی معین گردد. برای این هـدف، بایـد مشخصـات لایـههـای تشـکیل دهنـدهی ماسفت مشخص گردند.

۳-۱- مشخصات لابه ها

در این قسمت مشخصات لایه های مختلف مورد بررسی قرار می گیرد. شکاف انرژی (سیلیکان کششے از شکاف انـرژی سـیلیکان ریلکـس، کمتر است. مطابق [۱۳] شکاف انرژی سیلیکان کششی از رابطهی زیـر بدست میآید:

$$E_{gss} = 1.084 - x(0.31 + 0.53x) \tag{1}$$

اندیس ss مخفف strained Si است. لازم بـه ذکـر اسـت کـه در تمام روابط، x کسر مولی ژرمانیم لایهی SiGe ریلکس است. همچنین الكترون-خواهي" سيليكان كششي از رابطهي زير بدست مي آيد [١٣]:

$$\chi_{ss} = 4.05 + 0.58x \text{ eV}$$
 (7)

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

$$\mathcal{E}_{SiGe}(x) = 11.9 + 4.1x \tag{(7)}$$

SiGe نسبت به سیلیکان، شکاف انرژی کمتری دارد که از رابطه زير بدست مي آيد [۱۳]:

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

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

۲-۲- چگالی موثر حالات

$$n_{iss} = \sqrt{N_{Css} N_{Vss}} \exp\left(-\frac{E_{gss}}{2kT}\right) \tag{9}$$

در اینجا T دما و k ثابت بولتزمن است. درنتیجه باید مقدار چگالی موثر حالات^{۳۲} ($N_{Css} = N_{Css}$) در نوار انـرژی هـدایت و ظرفیـت مشخص شود که از روابط زیر محاسبه می گردند [۱۵]:

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

$$N_{Vss} = 2 \left(\frac{2\pi n_{hd(ss)}kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \tag{(A)}$$

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 می گردند:

$$m_{ed(ss)} = \left[2(m_{le(ss)}m_{le}^2)^{\frac{1}{2}} + 4(m_{le(ss)}m_{le}^2)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{-\Delta E_{csplit}}{kT}\right) \right]$$
(9)

Transverse

و

$$m_{hd(ss)} = \left(m_{hh(ss)}^{\frac{3}{2}} + m_{hh(ss)}^{\frac{3}{2}}\right)^{\frac{2}{3}}$$
(1.)

دراین روابط، $m_{te(ss)} = m_{te(ss)}$ دراین روابط، خرم موثر الکترون در راستای طولی^{۱۰} و عرضی a و $m_{hh(ss)}$ و $m_{hh(ss)}$ و $m_{hh(ss)}$ موثر حفرههای سبک و سنگین هستند. شکل (۲-الف) مقادیر مربوط به الكترون و شكل (۲-ب) مقادير مربوط به حفره را نمايش مىدهد.

Strained Si or 0.210 Si_{1-x}Ge_x 0.205 0.200 6⁰ 0.8 0.195 DOS mass LH Longitiudina 0.920 ● 이 H Journal нн 0.900 0.2 0.880 of Iranian so 0.860 0.5 0.4 0.6 Germanium fraction x Germanium fraction x 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 ^۱[۶], [۱۷] and Electronics

$$\Delta_4$$
 همچنین Δ_2 ، میزان جداسازی انـرژی دره هـای Δ_2 و Δ_2 است، طبق [۱۲] به صورت زیر بدست میآید:
 $\Delta E_{control} = 0.67x \text{ eV}$ (۱۱)

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

rica



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:

$$E_c - E_F = kT \ln \frac{N_c}{N_p} \tag{11}$$

که در این رابطه N_D میزان ناخالصی دهنده است.



سطح فرمی پلی سیلیکان نوع p، با توجه به آلایش بسیار بالای آن، منطبق بر Ev است[۱۹]. ازطرف دیگر، کشش باعث افزایش الکترون-خواهی و کاهش شکاف انرژی سیلیکان می گردد. درنتیجه

لایهی ظرفیت(E_v) سیلیکان کششی در تراز پایینتری نسبت به سیلیکان قرار می *گ*یرد.

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

در حالت تعادل^۸، با توجه به اینکه سطح فرمی در پلی سیلیکان نوع p پایین تر 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 می گردد. برای محاسبه میزان خمش سطوح انرژی، رابطهی زیر مورد استفاده قرار می گیرد:

$$\vec{E} = \frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx} \tag{17}$$

که نشان میدهد خمش نوار انرژی با میزان میدان الکتریکی متناسب است[۱۴]. درنتیجه، دراینجا میدان الکتریکی موجب خمش سطوح انرژی با شیب منفی می گردد که در شکل (۵) نشان داده شده است. وجود این خمش، باعث می گردد 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، نحـوه تـاثیر دوپینگ بستر مجازی بر کاهش نقش این کانال، مورد بررسی قرار می-گیرد. دراین بررسیها، دوپینگ کانـال برابـر ³³ m⁻¹×۴ و شـرایط دمای اتاق، درنظر گرفته میشود.

حالت اول – دوپینگ بستر مجازی، خیلی کمتر از دوپینگ کانال سیلیکانی کششی، ³ سیلیکانی ششی، ($em^{-3} \cdot 1 \cdot 1^{20} cm^{-3}$. در این حالت: $[\chi + (E_C - E_F)]_{s-si} \approx [\chi + (E_C - E_F)]_{siGe}$

nal of

وضعیت نوارهای انرژی قبل از پیوند مطابق شکل (۶-الف) و بعد از پیوند، به صورت شکل (۶-ب) می اشد. 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 می کند. این موضوع سبب می گردد 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 می گردد.



SiGe شکل (۶): ساختار باندهای انرژی پیوند سیلیکان کششی و برای حالت اول(⁶- ۲۰^۵ ش^۱۰۱)



SiGe شکل (۷): ساختار باندهای انرژی پیوند سیلیکان کششی و برای حالت دوم(⁻³ ۲۰۰^{۱۷})





 $[\chi + (E_c - E_F)]_{S-Si} > [\chi + (E_c - E_F)]_{SiGe}$ به نظر میرسد، وضعیت نوارهای انرژی مطابق شکل (۷–الف) باشد و با اتصال به هم، به صورت شکل (۷–ب) درآید. مشاهده می شود چاه کوانتومی نسبت به حالت قبل محدودتر شده است.

حالت سوم– دوپینگ بستر مجازی برابر دوپینگ کانال،³-۴×۱۰^{۱۷} cm

در این حالت نیز:

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

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 مقایسه ی 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 نوبه ی 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.

Journal of Iranian Association of Electrical

and

Electronics

Engineers - Vol.13- No.4-Winter

برای اینکار، V_{SG} برابر صفر و ولتاژ V_{SD} از صفر تا V_{SG} تغییر می کند. مطابق شکل (۱۰) مقدار جریان درین تا حدود $\Upsilon \cdot \mu A$ افزایش می یابد. این افزایش به ازای افزایش V_{SD} ، دارای رشد تقریبا خطی می باشد. این جریان تحت کنترل V_{SG} نیست و درنتیجه تنها باعث دورشدن ماسفت از شرایط ایده آل می گردد.



شکل (۱۳)، چگالی جریان عبوری را بازای V_{SD} - \cdot/h V در

ساختار قطعه نشان میدهد. همانطور که مشاهده می شود، بستر مجازی



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

حالت دوم- دوپینگ بستر مجازی: ۴×۱۰^{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 $\mu 4$ میرسد که کمتر از حالت قبل است. با این وجود، مطابق شکل (۱۴) (چگالی جریان عبوری بازای $V \wedge S_{D} = \cdot V_{SD}$)، همچنان کانال پارازیتی، نقش زیادی در عبور جریان دارد.

حالت سوم- دوپینگ بستر مجازی: ۴×۱۰^{۱۷} cm⁻³

مطابق شکل (۱۲) برای نمودار جریان برحسب V_{SD} ، مشاهده میشود که طبق انتظار، جریان کاهش یافته و حداکثر به 1 nA می رسد. همانطور که شکل (۱۵)(چگالی جریان عبوری از قطعه بازای V رسد. $V_{SD} = \cdot/\Lambda$ 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.

ضریب کاهش نسبت به حالت اول	حداكثر جريان	دوپینگ SiGe	حالت
١	۲ <i>۰</i> μΑ	$*\times1.^{10}$ cm ⁻³	١
۳۲٬۰	۴ ,8 µА	$r \times 1 \cdot r cm^{-3}$	٢
$\Delta \times 1 \cdot^{-\Delta}$	\ nA	$*\times1.^{17}$ cm ⁻³	٣

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

 $V_{SD} = \cdot / \epsilon V$ بنمودار لگاریتمی جریان درین برحسب V_{GS} بازای $V = \cdot / \epsilon V$ 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 حسد V_{SD} = ۰/۴ V بازای V_{SD} = ۰/۴ V

لازم به ذکر است هرروشی، همزمان با بهبود مشخصات، می تواند عوارضی نیز به همراه داشته باشد. مهم ترین عیب این روش، بالا بردن ولتاژ آستانه است. بسته به میزان تغییر دوپینگ بستر از حالت اول به حالت سوم، حداکثر ۷ ۱٫۱۰ به ولتاژ آستانه اضافه می گردد 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.

۲-۴- مقاومت خروجی ماسفت

مقاومت کانال در این نوع ماسفت حاصل ترکیب موازی دو (R_m) مقاومت کانال اصلی در سیلیکان کرنشی (R_m) و مقاومت ناشی از SiGe کانال پارازیتی در Rp) SiGe است. در دوپینگ های اندک SiGe مقاومت کانال پارازیتی، مقداری بسیار کمی است و مقاومت کل (R_0) امت. در تعیین می کند. با حذف تدریجی کانال پارازیتی مقدار مقاومت آن افزایش می یابد و در نتیجه مقدار مقاومت کل نیز افزایش خواهد یافت. تغییرات جریان ماسفت بر حسب V_{DS} را برای دوپینگ های مختلف SiGe تاین کانال پارازیتی، مقدار مقاومت کل (R_0) مخالف افزایش می یابد و در نتیجه مقدار مقاومت کل نیز افزایش خواهد یافت. Sige تعییرات جریان ماسفت بر حسب V_{DS} را برای دوپینگ های مختلف Sige تعییرات جریان ماسفت بر حسب در V را برای دوپینگ های مختلف Sige تعییرات جریان ماسفت بر حسب می دود، با افزایش دوپینگ و حذف کانال پارازیتی، شیب نمودار کاهش یافته و در نتیجه، پارامتر مدولاسیون طول کانال (Λ)، براساس جدول (۲)، کاهش می یابد و این موجب افزایش می به دواه رود.



 $V_{_{GS}} - V_{_{th}}$ =-+/۲ Vازای SiGe مختلف SiGe مختلف

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

مجازى

λ	(V^{-1})	دوپينگ SiGe	حالت
•	/FVT	$f \times 1 \cdot cm^{-3}$	١
•	148V	$f \times 1 \cdot f cm^{-3}$	٢
•	/۳۵Y	$f \times 1 \cdot \mathcal{V} cm^{-3}$	٣

Journal of Iranian Association of Electrical

and

Electronics

Engineers - Vol.13- No.4-Winter

نتایج تحلیل های ارائه شده، در طول های مختلف کانال صادق است و نشان داده می شود، افزایش دوپینگ SiGe، منجر به حذف تدریجی کانال پارازیتی و کاهش جریان خاموش ماسفت می گردد شکل (۱۹). شکل (۱۹) نسبت کاهش جریان ماسفت(نسبت جریان ماسفت در دوپینگ $cm^{-3} \times 1.0^{4}$ به جریان در $cm^{-3} \times 1.4^{4}$ بازای $V \wedge = cm^{-3}$) را برحسب طول کانال نشان می دهد. 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 کانال های کوچک، مقدار مقاومت در مقدار می و با حذف کانال پارازیتی و غالب شدن این بنابراین انتظار می رود، در کانالهای بزرگ، کاهش جریان بیش تری را نسبت به کانال کوچک اتفاق افتد.







از SiGe $V_{SD} = \cdot/\Lambda V$ ان $V_{SD} = \cdot/\Lambda V$

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

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 MV/cm ۵٫۰۰ اثر پراکندگی سطحی^{۱۱} 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 ^{3-c}m⁻³ (۲۰٪ ۲۰) با کار ارایه شده توسط سوگی[۸] و موبیلیتی موثر حفره درماسفت با کانال سیلیکونی غیرکرنشی [۲۱]

مطابق شکل (۲۰) مشاهده می شود چون کانال اصلی از داخل سیلیکان تحت کرنش عبور می کند، موبیلیتی نسبت به ماسفت سیلیکونی معمول افزایش می یابد و نسبت به کار سوگی و همکاران [۸] نیز موبیلیتی بهتر است. در کار سوگی، با اینکه کسر مولی ژرمانیم بستر مجازی، همانند اینکار ۲٫۳ 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 می-پیوندد. دومین علت افزایش نقایص ناشی از تغییرات شدید دوپینگ در درون سیلیکان کششی(کانال) است.

۵– نتیجه گیری

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 ^{۴-}۱۰ برابرکمتر کرد. همچنین مشاهده گردید افزایش دوپینگ SiGe باعث کاهش پارامتر مدولاسیون

۴٨

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.

زيرنويسها

- 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

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.4-Winter 20

- ¹⁷ Band bending
- ¹⁸ Equilibrium
- ¹⁹ Surface scattering

طول کانال و بهبود موبیلیتی می گردد. همچنین نشان داده شد که این روش در طول های مختلف کانال برقرار است. درنتیجه بدون افرایش ضخامت SiGe، می توان عملکرد ماسفت را بهبود بخشید.

سپاسگزاری

دراین قسمت برخـود لازم مـیدانـیم از مرحـوم دکتـر سـعید خـاتمی یادنماییم که محرک و مشوق پژوهش در حوزهی قطعات نیمـه هـادی 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 Geon-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 pchannel 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.

نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران-سال سیزدهم- شماره چهارم- زمستان ۱۳۹۵ 🕽