

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

محمد مهدی خاتمی<sup>۱</sup> مجید شالچیان<sup>۲</sup> محمدرضا کلاهدوز<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تربیت مدرس- تهران- ایران

[mmkhatami@aut.ac.ir](mailto:mmkhatami@aut.ac.ir)

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر - تهران- ایران

[shalchian@aut.ac.ir](mailto:shalchian@aut.ac.ir)

۳- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران - تهران- ایران

[kolahdouz@ut.ac.ir](mailto: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  $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ، ضمن تشکیل کانال با موبیلیتی موثر بالا، جریان حالت خاموش تا بیش از  $10^{-4}$  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

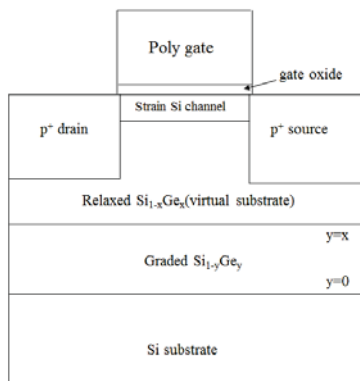
نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مجید شالچیان

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

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. در اینجا، 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 لایه‌ی از SiGe ضخیم (بستر مجازی<sup>۱</sup>) 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 لایه-ی SiGe، از لایه‌ی 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 ۴٫۲٪ در این لایه می‌گردد که x کسر مولی<sup>۱</sup> 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<sub>2</sub> به

مور<sup>۱</sup> 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 ارزان تر 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<sup>۲</sup> از طریق اعمال تنش<sup>۳</sup> بر ساختار شبکه سیلیکان است. اولین مورد، بر مبنای ایجاد کرنش شبکه سیلیکان در دومحور<sup>۴</sup> و مورد دوم، بر مبنای کرنش در یک محور<sup>۵</sup> 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<sup>۶</sup> رشد داده می‌شود. این عمل باعث ایجاد کرنش کششی<sup>۷</sup> در سیلیکان می‌گردد. در این کار، از شبیه سازی بوسیله TCAD برای تحقیق در مورد نتایج تئوری بهره‌گیری شده است و مدل‌ها، بر مبنای 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<sup>۸</sup> در SiGe شده که در نقش کانال پارازیتی موازی با کانال اصلی ظاهر می‌گردد. هرچند وجود کانال موازی در ظاهر موجب افزایش جریان می‌گردد، اما این کانال باعث بالا رفتن جریان نشتی و افزایش پارامتر مدولاسیون طول کانال (λ) و در نتیجه کاهش R<sub>o</sub> می‌گردد که این به نوبه خود کاهش بهره را در پی خواهد داشت. در نتیجه 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 مستقیماً 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 در پی داشته باشد.

$$N_{C_{ss}} = 2 \left( \frac{2\pi m_{ed(ss)} kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

و

$$N_{V_{ss}} = 2 \left( \frac{2\pi m_{hd(ss)} kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (8)$$

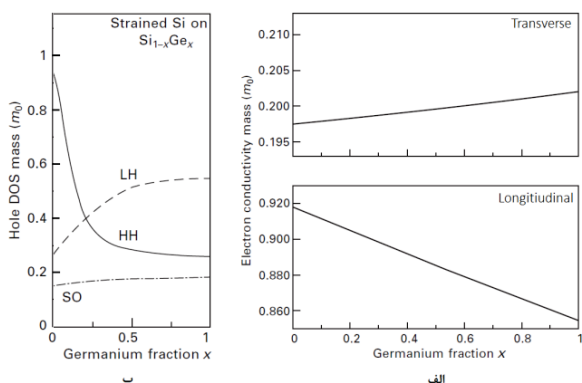
در این روابط  $h$  ثابت پلانک و  $m_{ed(ss)}$  و  $m_{hd(ss)}$  به ترتیب جرم موثر الکترون‌ها و حفره‌ها هستند و باتوجه به [۱۶] به صورت زیر محاسبه می‌گردند:

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

و

$$m_{hd(ss)} = \left( m_{lh(ss)}^{\frac{3}{2}} + m_{hh(ss)}^{\frac{3}{2}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (10)$$

در این روابط،  $m_{le(ss)}$  و  $m_{te(ss)}$  به ترتیب مولفه‌های جرم موثر الکترون در راستای طولی<sup>۱۴</sup> و عرضی<sup>۱۵</sup> و  $m_{hh(ss)}$  و  $m_{lh(ss)}$  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<sup>۱۶</sup>، [۱۷]

همچنین  $\Delta E_{csplit}$ ، میزان جداسازی انرژی دره های  $\Delta_2$  و  $\Delta_4$  است، طبق [۱۲] به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\Delta E_{csplit} = 0.67x \text{ eV} \quad (11)$$

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

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 دهنده ی ماسفت مشخص گردند.

#### ۳-۱- مشخصات لایه‌ها

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

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

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<sup>۱۲</sup> سیلیکان کششی از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید [۱۳]:

$$\chi_{ss} = 4.05 + 0.58x \text{ eV} \quad (2)$$

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

$$\varepsilon_{SiGe}(x) = 11.9 + 4.1x \quad (3)$$

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

$$E_G(Si_{1-x}Ge_x) = 1.084 - 0.42x \text{ eV} \quad (4)$$

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

$$\chi(Si_{1-x}Ge_x) = 4.05 - 0.05x \text{ eV} \quad (5)$$

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:

$$n_{iss} = \sqrt{N_{C_{ss}} N_{V_{ss}}} \exp\left(-\frac{E_{gss}}{2kT}\right) \quad (6)$$

در اینجا  $T$  دما و  $k$  ثابت بولتزمن است. در نتیجه باید مقدار چگالی موثر حالات<sup>۱۳</sup> ( $N_{V_{ss}}$  و  $N_{C_{ss}}$ ) در نوار انرژی هدایت و ظرفیت مشخص شود که از روابط زیر محاسبه می‌گردند [۱۵]:

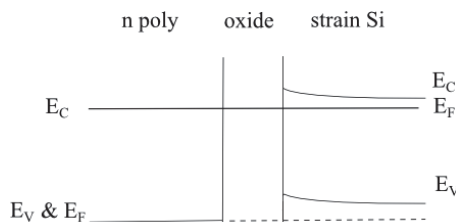
لایه‌ی ظرفیت ( $E_V$ ) سیلیکان کششی در تراز پایین‌تری نسبت به سیلیکان قرار می‌گیرد.

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 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<sup>۱۸</sup>، 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 در نتیجه سطح سیلیکان کششی نزدیک به پلی، دارای بار مثبت خواهد بود. در نتیجه میدانی از سمت سیلیکان به سمت پلی برقرار می‌گردد. برای محاسبه میزان خمش سطوح انرژی، رابطه‌ی زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$\vec{E} = \frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx} \quad (13)$$

که نشان می‌دهد خمش نوار انرژی با میزان میدان الکتریکی متناسب است [۱۴]. در نتیجه، در اینجا 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 دلیل فاصله‌ی بین پلی و سیلیکان، این شیب کم خواهد بود.



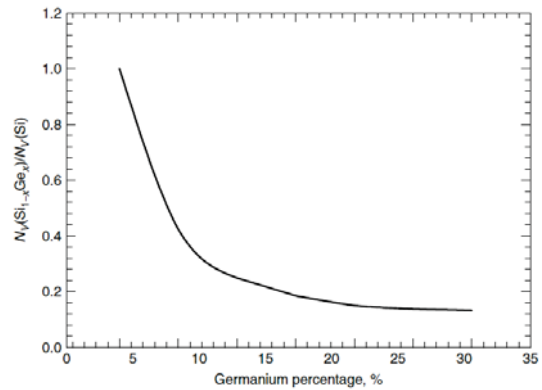
شکل (۵): نحوه تغییرات سطوح انرژی سیلیکان کششی بعد از برقراری تماس از طریق اکسید با پلی سیلیکان نوع p به عنوان گیت

### ۳-۴- 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. در این بررسی‌ها، دوپینگ کانال برابر  $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  و شرایط دمایی اتاق، در نظر گرفته می‌شود.

**حالت اول-** دوپینگ بستر مجازی، خیلی کمتر از دوپینگ کانال سیلیکانی کششی،  $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ .  
در این حالت:

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



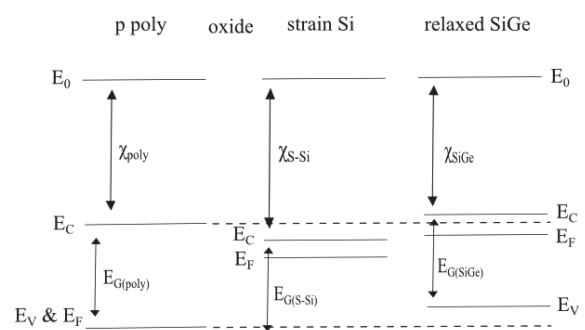
شکل (۳): نسبت چگالی موثر حالات نوار ظرفیت SiGe به سیلیکان [۱۸]

### ۳-۳- ساختار نوارهای انرژی در افزاره

در شکل (۴) ساختار نوار انرژی سه لایه‌ی سه مهم ماسفت یعنی گیت از نوع پلی سیلیکان، سیلیکان کششی و SiGe مشاهده می‌شوند. در هنگام 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<sup>۱۷</sup> 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:

$$E_C - E_F = kT \ln \frac{N_C}{N_D} \quad (12)$$

که در این رابطه  $N_D$  میزان ناخالصی دهنده است.



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

سطح فرمی پلی سیلیکان نوع p، با توجه به آرایش بسیار بالای آن، منطبق بر  $E_V$  است [۱۹]. از طرف دیگر، کشش باعث افزایش الکترون-خواهی و کاهش شکاف انرژی سیلیکان می‌گردد. در نتیجه

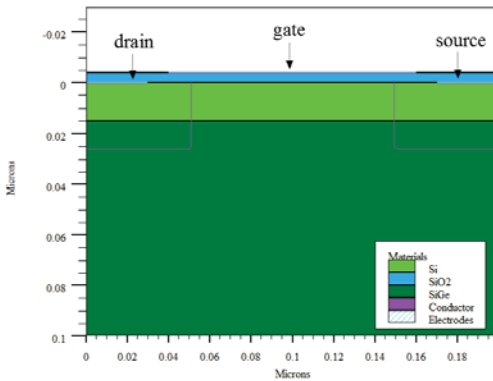
**حالت دوم-** دوپینگ بستر مجازی، کمتر از دوپینگ کانال سیلیکانی کششی،  $4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .  
در این حالت:

$$[\chi + (E_C - E_F)]_{S-Si} > [\chi + (E_C - E_F)]_{SiGe}$$
  
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،  $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .  
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 ملاحظه‌ای منجر به حذف این کانال گردد.



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

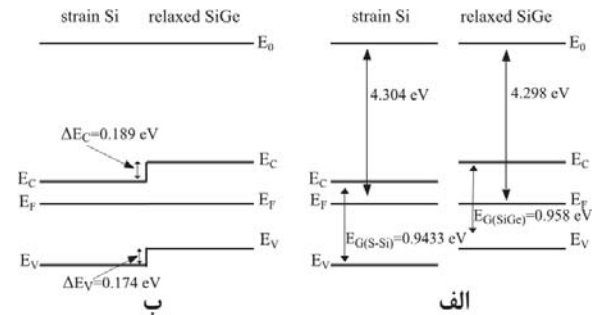
#### ۴- شبیه سازی

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 برای دوپینگ‌های مختلف زیرلایه مجازی ارائه می‌شود.

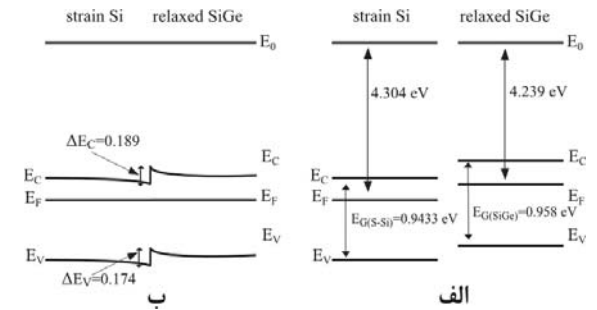
#### ۴-۱- جریان حالت خاموش

**حالت اول -** دوپینگ بستر مجازی  $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

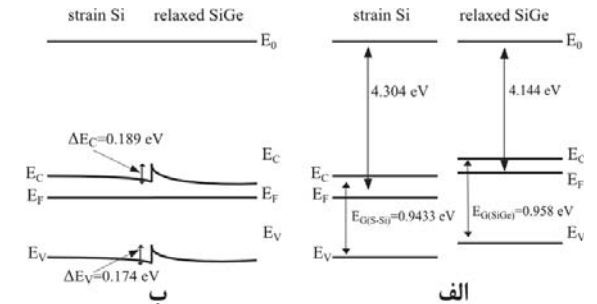
وضعیت نوارهای انرژی قبل از پیوند مطابق شکل (۶-الف) و بعد از پیوند، به صورت شکل (۶-ب) می‌باشد. سطح نوار ظرفیت در SiGe بالاتر از سیلیکان کششی است. حفره‌ها، تمایل به پرکردن انرژی‌های بالاتر را دارند؛ در نتیجه SiGe برای حفره‌ها، به عنوان چاه کوانتومی عمل می‌کند. این موضوع سبب می‌گردد حفره‌ها به سمت SiGe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



شکل (۶): ساختار باندهای انرژی پیوند سیلیکان کششی و SiGe برای حالت اول ( $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ )

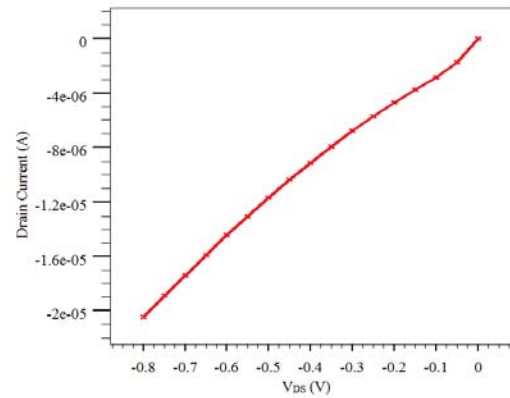


شکل (۷): ساختار باندهای انرژی پیوند سیلیکان کششی و SiGe برای حالت دوم ( $4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ )

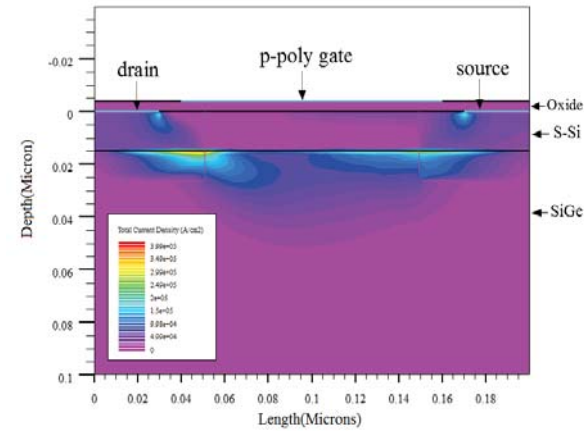


شکل (۸): ساختار باندهای انرژی پیوند سیلیکان کششی و SiGe برای حالت سوم ( $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )

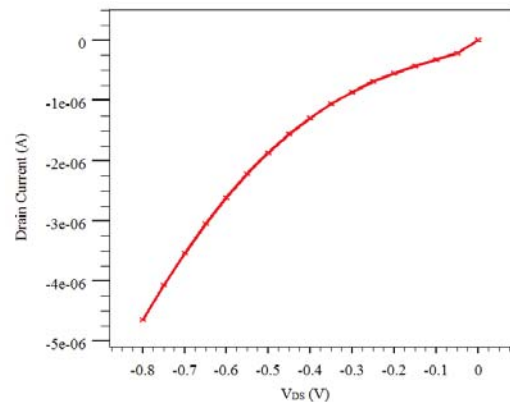
برای اینکار،  $V_{SG}$  برابر صفر و ولتاژ  $V_{SD}$  از صفر تا  $0.8\text{ V}$  تغییر می‌کند. مطابق شکل (۱۰) مقدار جریان درین تا حدود  $20\ \mu\text{A}$  افزایش می‌یابد. این افزایش به ازای افزایش  $V_{SD}$  دارای رشد تقریباً خطی می‌باشد. این جریان تحت کنترل  $V_{SG}$  نیست و در نتیجه تنها باعث دور شدن ماسفت از شرایط ایده آل می‌گردد.



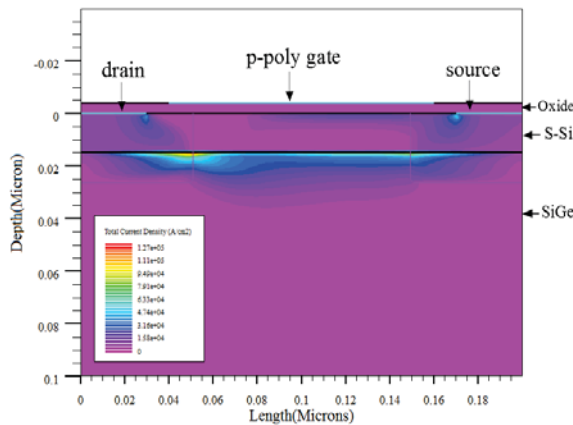
شکل (۱۰): جریان حالت خاموش ماسفت در حالت اول دوپینگ  $4 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$



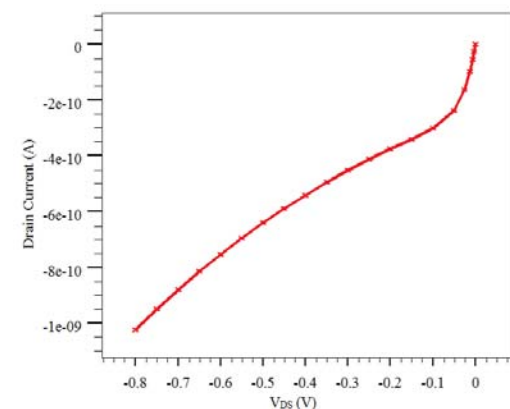
شکل (۱۳): چگالی جریان عبوری از ماسفت در حالت اول دوپینگ  $4 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$



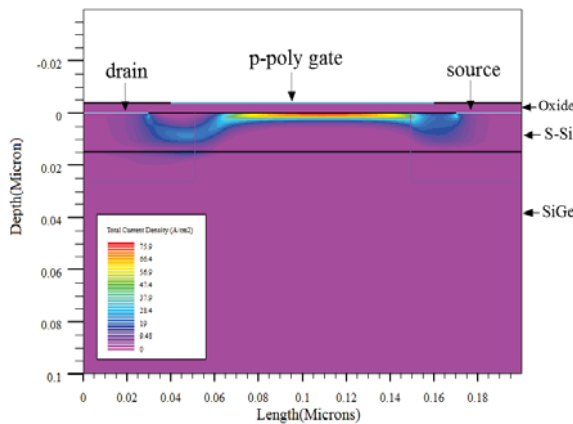
شکل (۱۱): جریان حالت خاموش ماسفت در حالت دوم دوپینگ  $4 \times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$



شکل (۱۴): چگالی جریان عبوری از ماسفت در حالت دوم دوپینگ  $4 \times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$



شکل (۱۲): جریان حالت خاموش ماسفت در حالت سوم دوپینگ  $4 \times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$



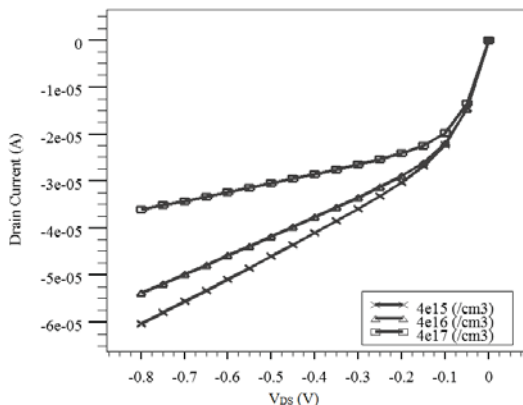
شکل (۱۵): چگالی جریان گذرنده در حالت سوم دوپینگ  $4 \times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$



لازم به ذکر است هر روشی، 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  $V_{th}$  به ولتاژ آستانه اضافه می‌گردد که این میزان، در مقایسه 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 ( $R_{in}$ ) و مقاومت ناشی از کانال پارازیتی در SiGe ( $R_p$ ) است. در دوپینگ‌های اندک SiGe، مقاومت کانال پارازیتی، مقداری بسیار کمی است و مقاومت کل ( $R_0$ ) 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 دوپینگ‌های مختلف SiGe نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود، با افزایش دوپینگ و حذف کانال پارازیتی، شیب نمودار کاهش یافته و در نتیجه، پارامتر مدولاسیون طول کانال ( $\lambda$ )، براساس جدول (۲)، کاهش می‌یابد و این موجب افزایش  $R_0$  و بهبود بهره خواهد گردید.



شکل (۱۷): جریان ماسفت بر حسب  $V_{DS}$  ماسفت برای دوپینگ‌های مختلف SiGe بازای  $V_{GS} - V_{th} = -0.2 V$

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

حالت	دوپینگ SiGe	$\lambda$ ( $V^{-1}$ )
۱	$4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	۰٫۴۷۳
۲	$4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	۰٫۴۶۷
۳	$4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	۰٫۳۵۷

**حالت دوم- دوپینگ بستر مجازی:**  $4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$   
همانطور که در بخش بحث شد، انتظار می‌رود در این حالت، چاه کوانتومی کمی محدود شود و جریان گذرنده از آن کاهش یابد. طبق شکل (۱۱)، جریان حداکثر به میزان  $4.6 \mu A$  می‌رسد که کمتر از حالت قبل است. با این وجود، مطابق شکل (۱۴) (چگالی جریان عبوری بازای  $V_{SD} = 0.8 V$ )، همچنان کانال پارازیتی، نقش زیادی در عبور جریان دارد.

**حالت سوم- دوپینگ بستر مجازی:**  $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

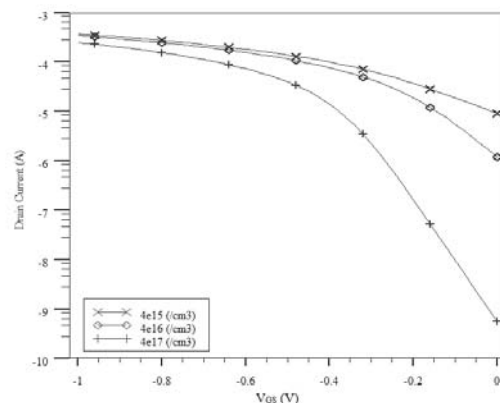
مطابق شکل (۱۲) برای نمودار جریان بر حسب  $V_{SD}$ ، مشاهده می‌شود که طبق انتظار، جریان کاهش یافته و حداکثر به  $1 nA$  می‌رسد. همانطور که شکل (۱۵) (چگالی جریان عبوری از قطعه بازای  $V_{SD} = 0.8 V$ ) نشان می‌دهد، چاه کوانتومی به طور کامل حذف گردیده است.

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	$4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	$20 \mu A$	۱
۲	$4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	$4.6 \mu A$	۰٫۲۳
۳	$4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	$1 nA$	$5 \times 10^{-5}$

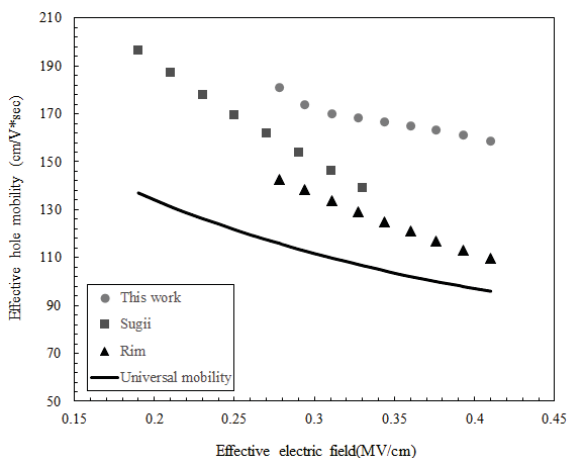
نمودار لگاریتمی جریان درین بر حسب  $V_{GS}$  بازای  $V_{SD} = 0.4 V$  در شکل (۱۶) رسم شده است. مشاهده می‌شود، با حذف کانال پارازیتی جریان خاموش و زیر آستانه کاهش محسوسی خواهد یافت.



شکل (۱۶): جریان ماسفت برای دوپینگ‌های مختلف SiGe بر حسب  $V_{GS}$  بازای  $V_{SD} = 0.4 V$

### ۴-۳- موبیلیتی

تأثیر 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. ضمناً با توجه به [۲۰] در میدان‌های کمتر از  $0.5 \text{ MV/cm}$ ، اثر پراکندگی سطحی<sup>۱۹</sup> قابل نظر بوده که در اینجا نیز در نظر گرفته نشده است.



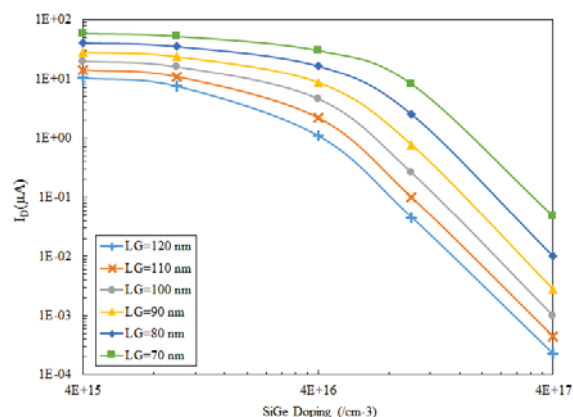
شکل (۲۰): مقایسه موبیلیتی موثر حفره در حالت سوم این کار (دوپینگ  $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) با کار ارایه شده توسط سوگی [۸] و موبیلیتی موثر حفره در ماسفت با کانال سیلیکونی غیر کرنشی [۲۱]

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  $0.3$  در نظر گرفته شده است، موبیلیتی کمتری گزارش شده است. اولین علت اینست که بستر مجازی به میزان  $86\%$  درصد ریلکس است و در نتیجه کشش کمتری به وقوع می‌پیوندد. دومین علت افزایش نقایص ناشی از تغییرات شدید دوپینگ در درون سیلیکان کششی (کانال) است.

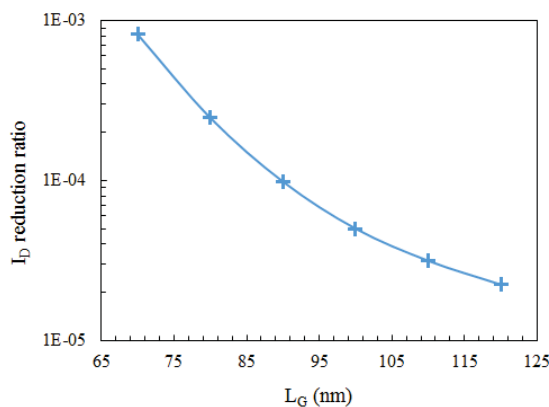
### ۵- نتیجه‌گیری

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  $10^{-4}$  برابر کمتر کرد. همچنین مشاهده گردید افزایش دوپینگ SiGe باعث کاهش پارامتر مدولاسیون

نتایج تحلیل‌های ارائه شده، در طول‌های 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  $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  به جریان در  $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  برای  $V_{SD} = 0.8 \text{ V}$ ) را برحسب طول کانال نشان می‌دهد. در طول کانال‌های بزرگ مقدار  $R_m$  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  $R_0$  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 برای  $V_{SD} = 0.8 \text{ V}$  برای طول‌های مختلف کانال



شکل (۱۹): ضریب کاهش جریان ماسفت با افزایش دوپینگ SiGe از  $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  به  $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  برحسب طول کانال برای  $V_{SD} = 0.8 \text{ V}$

- 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. Bhattacharjee, “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.

## زیر نویس ها

- 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

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

## سپاسگزاری

در این قسمت برخود لازم می‌دانیم از مرحوم دکتر سعید خاتمی یاد نماییم که محرک و مشوق پژوهش در حوزه‌ی قطعات نیمه هادی در دانشکده برق دانشگاه صنعتی امیر کبیر بوده‌اند.

## مراجع

- [1] ن. قبادی، ع. افضلی کوشا، "بررسی و مدل سازی اثر ناپایداری در دمای بالا و بایاس منفی (NBTI) و تزریق حامل های پرنرژژی (HCL) در افزاره های چندگیتی نانومتزی،" مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال دوازدهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۴
- [2] م. مرادی نسب، م. فتحی پور، "مدل بسته جریان-ولتاژ در ترانزیستورهای نانولوله کربنی آلائیده،" 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. Kolehdoz, "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. Kolehdoz, "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 Kolehdoz, "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.*