شبیه سازی اختلال رویداد منفرد در تکنولوژی سیلیسیم روی عایق

نفیسه خسروی، دانشجوی کارشناسی ارشد رشته فیزیک هسته ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان
(khosravi.nb@gmail.com)
مهسا مهراد، استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان
(mmehrad@du.ac.ir)
علیرضا قیاسی کرمانی، دانشجوی کارشناسی رشته مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان
(ghiasi.ali74@gmail.com)
بهزاد بقراطی، عضو هیئت علمی گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان
(b.boghrati@du.ac.ir)

چکیده

در این مقاله با استفاده از نرم افزار شبیه ساز Silvaco به دلیل امکان اندازه گیری و شبیه سازی برقراری جریان در ترانزیستور و همچنین دارا بودن قابلیت بررسی اختلال رویداد منفرد[1]، تعداد الکترون- حفره‌های ایجاد شده ناشی از انرژی تخلیه شده توسط پرتو آلفا در یک ترانزیستور نوع FinFET[2] مشخص شده و سه ساختار بدون اکسید، نیمه اکسید و تمام اکسید در حالتی که ترانزیستور در معرض تابش و بدون تابش قرار گیرند، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد در ساختار تمام اکسید به علت وجود لایه‌ی اکسید مدفون، حامل های کمتری در اثر پرتو آلفا ایجاد می گردد. همچنین این نتایج نشان می دهند که این شرایط در ساختار نیمه اکسید و بدون اکسید به مراتب بحرانی‌تر می گردد.

کلمات کلیدی: FinFET، اختلال رویداد منفرد، تعداد الکترون- حفره، سیلیسیم روی عایق[3]

1- مقدمه

تجهیزات الکترونیکی مورد استفاده در تمامی سیستم‌های اندازه‌گیری ذرات پر انرژی همچون مواردی مانند آنچه در آزمایش‌های مربوط به فیزیک انرژی‌های بالا، سیستم‌های تصویربرداری پزشکی هسته‌ای که در معرض پرتوهای پر انرژی و یون‌ساز ناشی از چشمه‌های پرتوزا و یا تابش‌های کیهانی هستند، ممکن است با اختلالاتی در عملکرد خود مواجه شوند. به دلیل کاربرد قطعات نیمه‌هادی در موارد ذکر شده، طی چند سال اخیر تحقیقات قابل ملاحظه‌ای به منظور بهبود عملکرد و مقاوم‌سازی ادوات نیمه‌هادی در برابر آثار و اختلالات ناشی از تابش‌ها انجام شده است. بطور کلی آسیب‌های وارد شده می توانند سبب اختلالات دائمی یا گذرا در نیمه‌هادی‌ها شوند [1]. بررسی این رفتارها هنگامی‌که سیستم‌ها تحت تابش قرار داشته باشند

[1] Single event upset
[2] Fin Field Effect Transistor
[3] Silicon on insulatur

www.SID.ir

یکی از موضوعات بسیار مهم در تحقیقات امروزی است. آثار اختلالات دائمی می‌توانند سبب تغییرات بلندمدت در مشخصات قطعه و مدارهای داخلی آن شوند [2]. به عنوان مثال، قابلیت برنامه‌ریزی قطعه نیمه-هادی مشخصی ممکن است برای همیشه مختل شود. آثار اختلالات گذرا که آثار رویداد منفرد[1]نامیده می-شوند، نیز می‌توانند شامل گستره‌ای از آثار باشند که می توان آنها را به دو دسته‌ی خطاهای سخت[2] و خطاهای نرم[3] تقسیم نمود. از جمله‌ی خطاهای سخت می‌توان به انواعی از رویداد منفرد مانند: قفل‌شدگی موقتی در گیتهای لاجیک[4]، تخریب گیت منطقی[5] و از کار افتادگی ناشی از سوختن[6] اشاره نمود و مواردی همچون تغییرات یا رخدادهای لحظه‌ای[7]، از کار ایستادن[8]، خطای وقفه[9] و اختلال رویداد منفرد، خطاهای نرم نامیده می‌شوند که در صورت تشخیص بروز هر یک از این آثار گذرا می‌توان به کمک روش‌های نرم‌افزاری یا قطع و وصل نمودن ولتاژ تغذیه این اختلال را برطرف نمود. از آنجا که در طی دوره کاری یک تراشه نیمه هادی، اختلال رویداد منفرد نسبت به سایر موارد بیشتر رخ می‌دهد، می‌بایست چگونگی رفتار و میزان دفعات تکرار وقوع آن را بررسی نمود [3] و[4].

در این مطالعه برخی از اثرات تابش بر روی ترانزیستورهای FinFET که از اساسی‌ترین ابزارها در میان ابزارهای تکنولوژی سیلیسیم روی عایق هستند [5-7] بررسی شده است. ابعاد کوچک، ساخت ساده و توان مصرفی پایین آنها سبب شده است در مدارهای زیادی از جمله تقویت کننده‌ها، مدارهای دیجیتالی و حافظه-ها استفاده شوند. بکارگیری این ترانزیستورها نیازمند اطلاعات مربوط به چگونگی ساختار آنهاست و به پارامترهای مختلف الکتریکی وابسته است.

در تکنولوژی سیلیسیم روی عایق، معمولا از لایه‌ی عایق دی اکسید سیلیسیم بین دو لایه‌ی سیلیسیم جهت جداسازی ناحیه فعال سیلیسیمی از بدنه سیلیسیمی استفاده می‌شود. این لایه باعث ایزولاسیون کامل الکتریکی در ترانزیستور شده و با کاهش اثر خازن‌های پارازیتی سبب افزایش سرعت مدارها خواهد شد. در شرایطی که در محیط، سطح تشعشعات و یا درجه حرارت بالایی وجود داشته باشد، مدارها و افزاره‌های سیلیسیم روی عایق به دلیل کاهش یافتن فضای سیلیسیم فعال و ایزولاسیون کامل الکتریکی که مانع افزایش جریان‌های نشتی می‌گردد. این امر سبب ایجاد مصونیت این نوع از قطعات در برابر تشعشعات ذرات کیهانی و تابش‌های پر انرژی که یکی از عوامل مهم درکاهش کارایی ادوات الکتریکی است شده و موجب برتری این تکنولوژی نسبت به سایر تکنولوژی ها می گردد [8].

بطور کلی، یکی از بهترین روش ها جهت مقاوم سازی ترانزیستورها در برابر تابش ها، استفاده از تکنولوژی سیلیسیم روی عایق می باشد. در این حالت با فرض اینکه کل ترانزیستور از نوع سیلیسیم باشد، در کنار آن یک طرف بارهای مثبت و یک طرف بارهای منفی جمع خواهد شد. حال هنگامی که ترانزیستور تحت تابش قرار بگیرد، هر چقدر قدرت نفوذ اشعه بیشتر شود، تابش مزبور وارد عمق بیشتری شده و به همان اندازه نیز

[1]Single-event effect
[2]Hard errors
[3]Soft errors
[4]Single event latchup
[5]Single event gate rupture
[6]Single event burnout
[7]Single event transient
[8]Hard errors
[9]Single event failure interrupt

www.SID.ir

تعداد الکترون حفره‌های نواحی اطراف بیشتر می‌شود. با قرار دادن دی اکسید سیلیسیم به عنوان لایه‌ی اکسید مدفون در وسط لایه‌ی سیلیسیم، چون جریان ترانزیستور اثر میدان بر روی سطح است، با رسیدن پرتو به لایه‌ی اکسید، تنها تعدادی الکترون-حفره در سطح آن ایجاد نموده اما از آنجا که نمی تواند از ناحیه عایقی عبور کند پس منجر به تولید الکترون-حفره اضافی نمی‌شود و تنها روی سطح مقدار کمی الکترون-حفره وجود دارد. در ادامه به شبیه سازی اثرات تابش با استفاده از نرم افزار SILVACO پرداخته می شود [9].

2- شبیه سازی اثرات تابش با نرم‌افزار SILVACO

نحوه‌ی کار این نرم‌افزار براساس مدل‌های فیزیکی و معادلات اصلی حاکم بر افزاره می‌باشد. کاربر باید ساختار و ابعاد افزاره، نوع ماده‌ی بکار رفته و خصوصیات فیزیکی آن را با رعایت قواعد خاص در یک فایل متنی بنویسد که لازم و ضروری است پدیده‌های فیزیکی حاکم بر افزاره را بداند به این علت که یک قسمت از فایل متنی تعریف افزاره، به مشخص کردن مدل‌های فیزیکی اختصاص دارد و در صورتی می‌توان نحوه‌ی عملکرد درست افزاره را بدست آورد که این مدل‌های فیزیکی صحیح مشخص شده باشند [10].

در این مقاله رفتار یک ترانزیستور اثر میدان هنگامی که در معرض تابش پرتوی آلفا قرار بگیرد مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این شبیه سازی، جزئیات هندسه‌ی این ترانزیستور اثر میدان به شکل مکعبی با ابعادی در مقیاس میکرومتر در نظر گرفته شده و همچنین پرتو آلفای تابیده شده به به آن نیز بصورت استوانه‌ای با انرژی مشخص فرض شده است. با تابش پرتو به ترانزیستور مشخصه‌ی جریان درین برحسب ولتاژ درین و ولتاژ گیت،میزان تغییرات تعداد الکترون- حفره و میدان الکتریکی آن ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

همانطور که پیشتر اشاره شد، در ترانزیستورهای اثر میدان فقط جریان سطحی وجود دارد. این جریان در اثر حرکت حامل‌ها به وجود آمده است و با اعمال ولتاژ به درین و اتصال سورس به ولتاژ صفر، اختلاف پتانسیل ایجاد می‌گردد. جریان الکترون‌ها سبب می‌شود در مواجهه با مقدار زیادی بار مثبت (n^+) با حفره‌ها همسو - شوند، مقدار زیادی الکترون بر روی لبه می‌آید و ممکن است در ناحیه تخلیه بازترکیب رخ دهد. در این ناحیه، به گیت ولتاژ اعمال می‌شود و از بار تهی می‌گردد. چون در این ناحیه باری وجود ندارد، حامل‌ها (حفره‌ها) شروع به حرکت می‌کنند و جریان برقرار می‌شود.

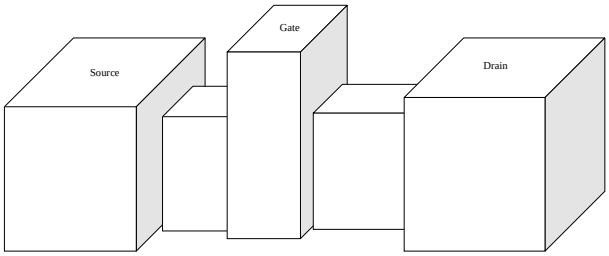
انتخاب مدل‌های بازترکیب (شاتکی-هال-رید) و یونیزاسیون برخوردی، در پیش برد صحیح برنامه مهم است. برای به وجود آمدن جریان و محاسبه‌ی آن باید معادله‌ی پواسون حل گردد. برای حل این معادله روش نیوتن رافسون مناسب می باشد. با سعی و خطا ولتاژها اعمال می‌شوند و محاسبه‌ی جریان تا جایی ادامه پیدا می-کند تا همگرایی به یک عدد محقق شود. آستانه‌ی تحمل ترانزیستور تا ولتاژ مشخصی می باشد و چنانچه از حد موردنظر بگذرد، ترازیستور کارایی خود را دست داده و نرم افزار با پیام خطایی آنرا گزارش می‌دهد.

شبیه سازی رفتار ترانزیستور برای دو حالت تابش پرتو با ذره‌ی آلفا و حالتی که بدون تابش است، در سه ساختار بدون اکسید، نیمه اکسید و تمام اکسید اجرا شده و تعداد الکترون- حفره‌ها مورد بررسی قرار گرفته اند.

در شکل 1 نمایی از ترانزیستور FinFET مورد نظر نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است دو لایه ی سیلیسیومی نازک به نام Fin نواحی سورس و درین را به کانال ترانزیستور متصل می‌کند.

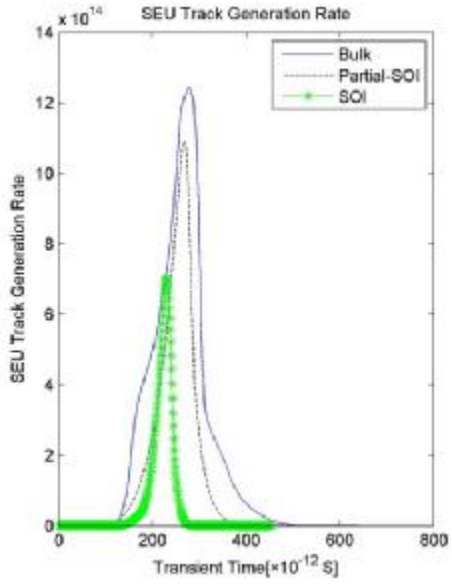
Archive of SID
www.SID.ir

لازم به ذکر است که ترانزیستور FinFET از دسته ترانزیستورهای چند گیتی به منظور کنترل بهتر روی ناحیه‌ی گیت ترانزیستور می‌باشد.



شکل1: نمایی از ترانزیستور سه گیتی FinFET

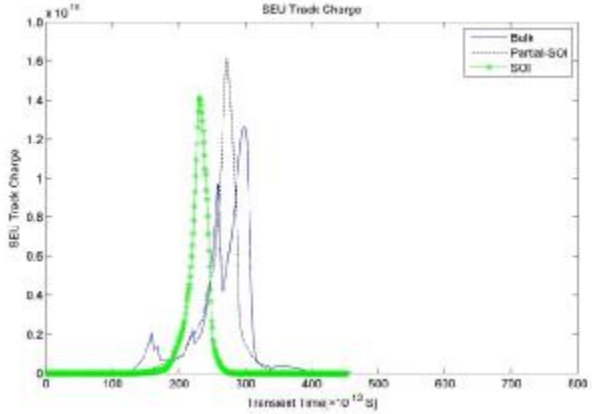
در شکل 2 نتایج خروجی شبیه سازی برای نرخ بارهای تولید شده (SEU) در اثر تابش پرتو آلفا به کانال ترانزیستور در سه حالت تمام اکسید، نیمه اکسید و بدون اکسید نشان داده شده است. همان طور که مشخص است لایه‌ی اکسید مدفون مانع از تولید حامل‌های بیشتر در کانال ترانزیستور می گردد.



شکل2: نرخ تولید در اثر تابش پرتو آلفا به کانال ترانزیستور اثر میدان در سه حالت تمام اکسید، نیمه اکسید و بدون اکسید

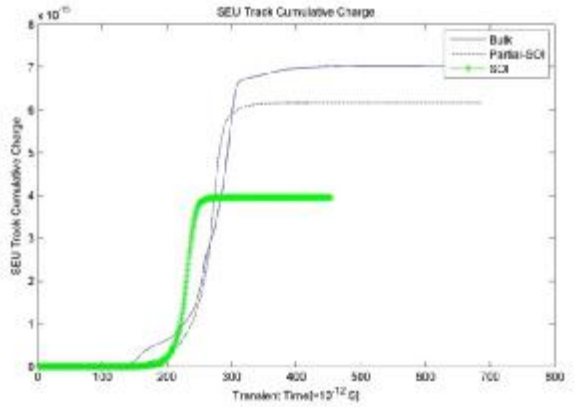
در شکل 3 تغییرات بارهای ایجاد شده در کانال ترانزیستور بر حسب زمان در یک ترانزیستور FinFET در حالتی که اشعه‌ی آلفا به صورت استوانه ای به افزاره تابیده شده باشد، نمایش داده شده است. همان طور که مشخص است، تغییرات بارها در دو حالت بدون اکسید و نیمه‌اکسید در رنج زمانی بیشتری گسترده شده است. اما در ساختار سیلیسیم روی عایق علاوه بر این که مقدار بار ایجاد شده به مراتب کمتر از دو ساختار دیگر می‌باشد، این بارها در مدت زمان کمتری در کانال ترانزیستور قرار دارند. بنابراین می‌توان با تکنولوژی سیلیسیم روی عایق کنترل بیشتری بر روی بارهای تولید شده ناشی از پرتو آلفا داشت.

www.SID.ir



شکل3: مقدار بار ایجاد شده در کانال ترانزیستور FinFET در اثر تابش پرتو آلفا

در اثر تابش پرتو آلفا، الکترون و حفره در کانال ترانزیستور ایجاد می‌گردد. الکترون‌ها می‌توانند در ایجاد جریان نقش داشته باشند. اما حفره‌ها به عنوان یک عامل مزاحم در کانال ترانزیستور انباشته می‌شوند و مشخصات ترانزیستور را تغییر می‌دهند. مهمترین اثر مخرب بارهای انباشته در کانال ترانزیستور، اثر بدنه شناور می‌باشد [11]. دراین مقاله با بررسی انجام شده این نتیجه حاصل می‌شود که با تکنولوژی سیلیسیم روی عایق می‌توان تولید الکترون و حفره ها را در کانال ترانزیستور کنترل نمود. همان طور که در شکل 4 مشخص می‌باشد میزان انباشتگی بار در ساختار تمام اکسید به مراتب از دو ساختار دیگر بهترمی باشد.



شکل4: میزان انباشتگی بارهای ایجاد شده در کانال ترانزیستور در اثر تابش پرتو آلفا

3- نتیجه گیری

در این مقاله تاثیر استفاده از تکنولوژی سیلیسیم روی عایق و میزان مقاوم سازی رفتار و مشخصات الکتریکی یک ترانزیستور از نوع FinFet در برابر پرتو آلفا مورد بررسی قرار گرفت. نفوذ تابش ها از جمله تابش ذره آلفا و تخلیه انرژی آن در ترانزیستور نوع FinFet سبب ایجاد بارهای مثبت و منفی شده و باعث تغییراتی در پارامترهای الکتریکی آن می‌گردد. اگر کل ناحیه اکسید باشد این بارها به زیر لایه نفوذ نمی‌کنند اما این بارها سبب می‌شوند جریانی ناشی از تابش در عمق ترانزیستور شکل بگیردکه مناسب نیست. مزیت وجود لایه‌ی اکسید سیلیسیوم به عنوان لایه اکسید مدفون در وسط لایه سیلیسیوم یا به عبارتی سیلیسیوم روی عایق این است که سبب می گردد به هنگام برخورد پرتو به ترانزیستور، تجمع حفره ها کم شده و بار تجمعی ناشی از

www.SID.ir

حفره ها که یک عامل مزاحم در مشخصه ترانزیستور است به شدت کاهش یابد. در نتیجه استفاده از این تکنولوژی در ساخت ترانزیستورهای مقاوم در برابر تابش بسیار مفید و ضروری خواهد بود.

مراجع

(2007). **Radiation Effects on Embedded Systems**, springer, pp [1] Velazco, R., Fouillat P., and Reis R. 1-29 .

[2] Autran J. (2015), **Soft Errors From Particles To Circuits**, Atomic Nano Scale Technology in the Nuclear Industry.

[3] Gadlage M.J. , Roach A.H. , Duncan A.R. , Savage M.W. and Kay M.J.(2015) **Electron-induced single-event upsets in 45-nm and 28-nm bulk CMOS SRAM-based FPGAs operating at nominal voltage**, IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 62, no. 6, pp. 2717-2724.

[4] Weller, R.A., Mendenhall, M.H., Reed R.A., Schrimpf, R.D., Warren, K.M., Sierawski, B.D., and Massengill, L.W. (2010), **Monte Carlo Simulation of Single Event Effects**,IEEE Trans. Nucl. Sci.,VOL. 57, NO. 4, pp. 1726-1746.

[5] Mehrad, M., Orouji, A.A. (2010), **Partially cylindrical fin field-effect transistor: a novel device for nanoscale applications**, IEEE Transactions on Device and Materials Reliability 10 (2), 271-275.

[6] Orouji, A.A., Mehrad, M. (2011), **A new rounded edge fin field effect transistor for improving self-heating effects**, Japanese Journal of Applied Physics 50 (12R), 124303.

[7] Mehrad, M. and Orouji, A.A. (2011), **A new nanoscale and high temperature field effect transistor: Bi level FinFET**, Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures 44 (3), 654-658.

[8] J. P. Colinge, Silicon-on-insulator technology: materials to VLSI, 3rd ed., Kluwer Academic Publishers, 2004.

Device simulator ATLAS, Silvaco International; 2016. [9]

[10] طباطبایی پور، سید غیاث الدین(1393)، «شبیه سازی ادوات نیمه‌هادی با نرم‌افزار سیلواکو»، وبلاگ مرجع آموزش سیلواکو.

[11] میرعشقی، سید علی (1380)، «مبانی الکترونیک»، جلد اول، چاپ سی و هشتم، اصفهان: نشر شیخ بهایی.

Archive of SID

www.SID.ir