بررسی و مدل‌سازی اثر ناپایداری در دمای بالا و بایاس منفی (NBTI) و تزریق حامل‌های پرانرژی (HCI) در افزاره‌های چندگیتی نانومتری

نیره قبادی[1] **علی افضلی کوشا**[2]

۱- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه زنجان
n.ghobadi@znu.ac.ir
۲- استاد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران
afzali@ut.ac.ir

چکیده : در این مقاله با استفاده از روش حل چندبعدی معادلات واکنش-نفوذ (R-D)، مدل‌هایی برای پدیده ناپایداری در دمای بالا و بایاس منفی (NBTI) در یک MOSFET سه گیتی کانال P و پدیده تزریق حامل‌های پرانرژی (HCI) در یک افزاره FinFET سه گیتی توده کانال N ارائه می‌شود. سپس نتایج حاصل از مدل با نتایج تجربی مقایسه شده و بستگی تغییرات توان زمان در مدل با ابعاد و شکل افزاره بررسی می‌شود. نتایج به دست آمده در مقاله بیانگر این است که در افزاره‌های سه گیتی به علت ساختار افزاره و اثر گوشه‌های بدنه، تولید تله در اثر پدیده‌های NBTI و HCI، نسبت به افزاره‌های MOSFET مسطح بیشتر و طول عمر افزاره کمتر می‌باشد. همچنین در ادامه اثر بدنه شناور روی پدیده NBTI در یک افزاره MOSFET دوگیتی با استفاده از روش حل یک بعدی معادله پواسون در ناحیه‌ی وارونگی مدل می‌شود و با حالت وجود اتصال بدنه مقایسه می‌شود. نتایج حاصل با استفاده از روش حل عددی FDM تأیید می‌شود و نتایج حاصل بیانگر این است که به علت تجمع الکترون‌های حاصل از تولید تله‌ها در اثر پدیده NBTI در بدنه شناور و اثر این الکترون‌ها در کاهش میدان اکسید، اثر این پدیده در افزاره‌های دارای بدنه شناور کم شده و طول عمر افزاره افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: ناپایداری در دمای بالا و بایاس منفی (NBTI)، تزریق حامل‌های پرانرژی (HCI)، افزاره‌های چند گیتی، مدل واکنش-نفوذ (R-D) ، اثر بدنه شناور، معادله پواسون

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۱/۶/۲۸
تاریخ پذیرش مشروط : ۱۳۹۲/۹/۲۳
تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۳/۷/۶
نام نویسنده‌ی مسئول: نیره قبادی
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – زنجان- بلوار دانشگاه- دانشگاه زنجان- کدپستی: ۴۵۳۷۱-۳۸۷۹۱

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

۱- مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی CMOS و کوچک شدن ابعاد ترانزیستورها به خصوص عرض دی‌الکتریک گیت و مقیاس نشدن ولتاژ تغذیه متناظر با آن، پدیده‌ها و چالش‌های متعدد و جدیدی در ارتباط با قابلیت اطمینان افزاره ها و مدارات در ابعاد نانومتری مطرح شده است. این پدیده‌ها سبب ایجاد تله[۱]هایی در فصل مشترک سیلیکون و اکسید و در نتیجه تغییر در پارامترهای اساسی افزاره شامل کاهش رسانایی انتقال[۲] (g_m)، کاهش جریان خطی[۳] و اشباع درین[۴]($I_{d,lin}$, $I_{d,sat}$) ، کاهش قابلیت حرکت[۵] در کانال (μ_{eff})، کاهش شیب زیر آستانه[۶](S) ، افزایش جریان خاموشی (I_{off})، افزایش قدر مطلق ولتاژ آستانه[۷] (V_{th}) و درنتیجه کاهش کارایی و طول عمر افزاره می‌شوند. از جمله مهمترین این پدیده‌ها، اثر ناپایداری در دمای بالا و بایاس منفی[۸] (NBTI) در افزاره‌های کانال P [۱-۵] و اثر تزریق حامل‌های پرانرژی[۹] (HCI) در افزاره‌های کانال N می‌باشد [۶-۱۱].

اثر NBTI مهمترین چالش مربوط به قابلیت اطمینان در افزاره‌های نانومتری کانال P می‌باشد. با وجود اینکه این اثر بیش از ۴۰ سال پیش برای اولین بار گزارش شد [۱۲]، امروزه مجدداً به مهمترین نگرانی طراحان مدارات دیجیتال و آنالوگ در رابطه با قابلیت اطمینان افزاره تبدیل شده است. از دلایل مهم شدن دوباره این اثر می‌توان به افزایش میدان الکتریکی اکسید به علت کوچک شدن ضخامت اکسید گیت و مقیاس نشدن ولتاژ تغذیه متناظر با آن، دمای کاری بالاتر افزاره‌ها به علت افزایش توان مصرفی، جایگزینی ترانزیستورهای کانال P مدفون[۱۰] با ترانزیستورهای سطحی، معرفی و استفاده بیشتر از CMOS و در نتیجه افزایش اهمیت و استفاده از ترانزیستورهای کانال P و استفاده از اکسی‌نیتریدها با ضریب نفوذ پذیری بالاتر اشاره کرد [۱۳].

اثر HCI مهمترین پدیده مؤثر در قابلیت اطمینان افزاره‌های کانال N می‌باشد. دلیل مهم‌تر بودن این پدیده در افزاره‌های نوع N، قابلیت حرکت بیشتر الکترون‌ها نسبت به حفره‌ها می‌باشد. در صورت وجود میدان الکتریکی قوی در ناحیه نزدیک درین، پدیده HCI مانند NBTI سبب تولید تله‌های فصل مشترک و توده[۱۱] اکسید در این ناحیه می‌شود [۱۴].

این مقاله به مدل‌سازی این پدیده‌ها در افزاره‌های جدید نانومتری اختصاص دارد. در بخش دوم یک مدل تحلیلی برای توصیف پدیده NBTI در افزاره‌های MOSFET سه‌گیتی با استفاده از حل معادلات واکنش-نفوذ[۱۲] (R-D) به صورت چند بعدی ارائه می‌شود و اثر ساختار افزاره و گوشه‌ها روی این پدیده و میزان تولید تله‌ها بررسی می‌شود. در بخش سوم به مدل‌سازی میزان تله‌های تولید شده در اثر پدیده HCI در افزاره FinFET سه گیتی با استفاده از حل معادلات R-D پرداخته می‌شود. در ادامه در بخش چهارم اثر بدنه شناور[۱۳] روی پدیده NBTI با مدل کردن این پدیده در یک MOSFET دوگیتی بررسی می‌شود. در پایان نتایج حاصل بیان می‌شوند.

۲- پدیده‌ی NBTI در افزاره‌های MOSFET سه‌گیتی

۲-۱- مدل سازی پدیده‌ی NBTI

پدیده‌ی NBTI در اثر تولید تله‌های فصل مشترک یا توده اکسید اتفاق می‌افتد. حفره‌های مثبت به علت وجود میدان قوی در اکسید، به سمت پیوندهای Si-H تونل می‌زنند و سبب ضعیف شدن پیوندهای Si-H می‌شوند. هیدروژن در اثر ارتعاش گرمایی پیوند شیمیایی جدا می‌شود [۱۵] و پیوند آزاد سیلیکون باقی مانده (Si^+)، به صورت یک تله فصل مشترک دهنده[۱۴] عمل می‌کند [۱۶]. هیدروژن جدا شده به درون اکسید نفوذ کرده و یا دوباره با یک تله پیوند برقرار می‌کند. به این ترتیب میزان تله‌های فصل مشترک افزایش می‌یابد و سبب ناپایداری پارامترهای اساسی افزاره مطابق رابطه‌ی (۱) می‌شود [۱۷].

$$\Delta V_{th} = \frac{qN_{it}}{C_{ox}} \qquad (۱)$$

در رابطه‌ی (۱)، ΔV_{th} تغییرات ولتاژ آستانه، N_{it} چگالی تله‌های فصل مشترک و C_{ox} خازن اکسید گیت می‌باشد. تاکنون مدل استاندارد واکنش-نفوذ (R-D) تنها مدلی بوده است که توانسته وابستگی توانی[۱۵] به زمان تولید تله‌های فصل مشترک در اثر NBTI را توجیه کند [۱۸]. این مدل توسط معادلات (۲) و (۳) توصیف می‌شود [۱۹]

$$\frac{dN_{it}}{dt} = k_F\left(N_0 - N_{it}\right) - k_R N_H N_{it} \qquad (۲)$$

$$\frac{dN_H}{dt} = D_H\left(\frac{d^2 N_H}{dx^2}\right) \qquad (۳)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

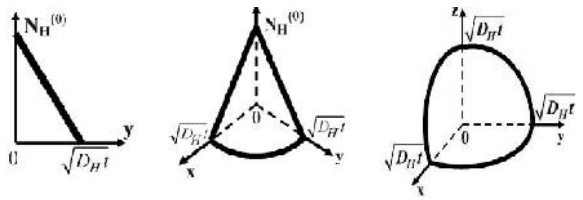
در روابط (۲) و (۳)، N_0 چگالی اولیه پیوندهای Si-H ، N_H چگالی اتم‌های هیدروژن در فصل مشترک، k_F نرخ واکنش مستقیم[۱۶]، k_R نرخ واکنش معکوس[۱۷] و D_H ثابت نفوذ هیدروژن در اکسید است. در مراحل اولیه فاز تنش، تولید تله کند می‌باشد [۱۹]، بنابراین $(dN_{it}/dt\approx 0)$ و $(N_{it}<<N_0)$ و می‌توان رابطه‌ی (۲) را به صورت رابطه‌ی (۴) در نظر گرفت.

$$N_H N_{it} \approx \frac{k_F}{k_R} N_0 \qquad (۴)$$

برای یک ترانزیستور MOSFET ساده، این مدل و معادله نفوذ اتم‌های هیدروژن یک بعدی است. ولی در حالت کلی و بویژه در گوشه‌ها بسته به ابعاد و شکل افزاره، نفوذ هیدروژن دو بعدی و یا سه بعدی خواهد بود و بنابراین نفوذ هیدروژن در حالت کلی از روابط زیر تبعیت می‌کند [۲۰].

$$\frac{dN_H}{dt} = D_H \nabla^2 N_H \qquad (۵)$$

$$N_{it}(t) = \int N_H(r,t) d^3 r \qquad (۶)$$



(a) (b) (c)

شکل (۱): پروفایل هیدروژن برای نفوذ الف) یک بعدی، ب) دو بعدی و ج) سه بعدی در اکسید [۲۰]

پروفایل هیدروژن برای نفوذ یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی در اکسید در شکل (۱) نشان داده شده است.با استفاده از این شکل، روابط (۷) تا (۹) برای میزان تله‌های تولید شده در اثر نفوذ اتم‌های هیدروژن به صورت یک بعدی، دوبعدی و سه بعدی به‌دست می‌آیند [۲۰].

$$N_{it}^{(1-D)}(t) = \int_0^{\sqrt{D_H t}} N_H^{(0)} \left(1 - \frac{y}{\sqrt{D_H t}}\right) dy \qquad (۷)$$

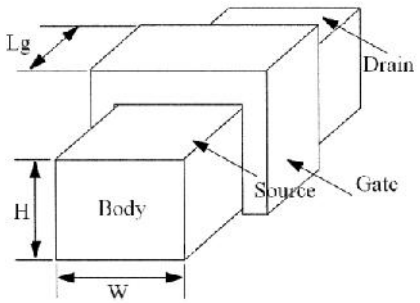
$$N_{it}^{(2-D)}(t) = \frac{1}{4} \int_0^{\sqrt{D_H t}} N_H^{(0)} \left(1 - \frac{r}{\sqrt{D_H t}}\right) 2\pi r dr \qquad (۸)$$

$$N_{it}^{(3-D)}(t) = \frac{1}{8} \int_0^{\sqrt{D_H t}} N_H^{(0)} \left(1 - \frac{r}{\sqrt{D_H t}}\right) 4\pi r^2 dr \qquad (۹)$$

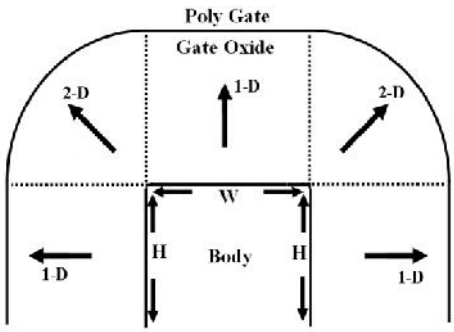
$x_D=(D_H t)^{1/2}$ طول نفوذ هیدروژن در اکسید است. در صورت ترکیب ذرات هیدروژن باهم و نفوذ به صورت مولکولی (H_2)، رابطه چگالی اتم‌های هیدروژن و مولکول‌های هیدروژن مطابق رابطه‌ی (۱۰) می‌باشد [۲۱].

$$N_{H_2} = k_H N_H^2 \qquad (۱۰)$$

ساختار یک افزاره MOSFET سه گیتی در شکل (۲) نشان داده شده است. شکل (۳) سطح مقطع یک افزاره MOSFET سه‌گیتی و مسیر نفوذ هیدروژن به سمت گیت را در پنج ناحیه مختلف این افزاره نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل دیده می‌شود نفوذ در گوشه‌ها به صورت دو بعدی و در سه گیت مسطح به صورت یک بعدی می‌باشد [۲۰]. بنابراین با فرض نفوذ هیدروژن به صورت مولکولی و با استفاده از روابط (۷) تا (۹)، رابطه‌ی میان تله‌های تولید شده و مولکول‌های هیدروژن از رابطه‌ی (۱۱) به دست می‌آید.



شکل (۲): ساختار یک افزاره MOSFET سه گیتی



شکل (۳): یک افزاره MOSFET سه گیتی و مسیر نفوذ هیدروژن به سمت گیت در اثر NBTI در پنج ناحیه از این افزاره [۲۰]

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

$$N_{it}=\frac{1}{(W+2H)L}\left\{2\int_0^{\sqrt{D_{H_2}t}}N_{H_2}\left(1-\frac{z}{\sqrt{D_{H_2}t}}\right)LWdz+\right.$$
$$4\int_0^{\sqrt{D_{H_2}t}}N_{H_2}\left(1-\frac{y}{\sqrt{D_{H_2}t}}\right)LHdy+$$
$$\left.\int_0^{\sqrt{D_{H_2}t}}N_{H_2}\left(1-\frac{r}{\sqrt{D_{H_2}t}}\right)2\pi rLdr=\right.$$
$$=N_{H_2}\left[\sqrt{D_{H_2}t}+\frac{\pi D_{H_2}t}{3(W+2H)}\right] \qquad (11)$$

در رابطه‌ی (۱۱)، N_{H2} میزان مولکول‌های هیدروژن در فصل مشترک، L طول گیت، W عرض بدنه و H ارتفاع بدنه می‌باشد. با استفاده از روابط (۴)، (۱۰) و (۱۱)، میزان تله‌های تولید شده در اثر NBTI از رابطه (۱۲) به دست می‌آید.

$$N_{it}=\left(\frac{\sqrt{k_H}k_F N_0}{k_R}\right)^{(2/3)}\left[\sqrt{D_{H_2}t}+\frac{\pi D_{H_2}t}{3(W+2H)}\right]^{(1/3)} \qquad (12)$$

$$k_F \approx B\sigma_0 Q_i e^{\left(\frac{2E_{OX}}{E_0}\right)} \qquad (13)$$

$$D_{H_2}=D_0 e^{\left(\frac{-E_a}{KT}\right)} \qquad (14)$$

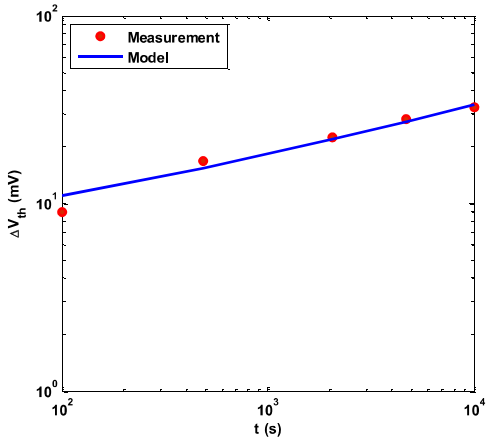
در روابط (۱۳) و (۱۴)، Q_i چگالی حفره‌های ناحیه وارونگی، σ_0 سطح مقطع برخورد تسخیر[18] پیوندهای Si-H، B احتمال (وابسته به میدان) شکستن پیوندهای Si-H، E_{ox} میدان الکتریکی در اکسید گیت، E_a انرژی فعال سازی[19] شکستن پیوندهای Si-H و E_0 و D_0 پارامترهای تطبیقی می‌باشند که از نتایج تجربی میزان تله تولیدی برای ولتاژهای مختلف اعمالی به گیت به دست می‌آید.

۲-۲- نتایج و بحث

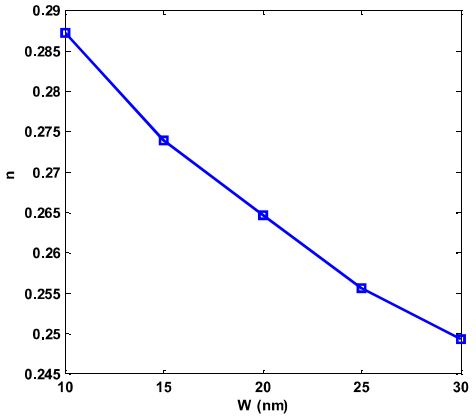
رابطه‌ی (۱۲) دارای چهار پارامتر تطبیقی[20] K_{NBTI} ، E_0 ، D_0 و E_a می‌باشد که باید از نتایج تجربی به دست آیند. برای به دست آوردن این پارامترها از نتایج عملی موجود در تحقیقات گذشته [۲۲] استفاده می‌کنیم. افزاره مورد بررسی یک MOSFET سه گیتی با طول گیت ۹۰ نانومتر، ضخامت اکسید ۱/۵ نانومتر و با بدنه‌ای به عرض ۲۸ نانومتر و ارتفاع ۳۶ نانومتر می‌باشد. روش به کار رفته برای به دست آوردن این پارامترها روش کمترین ریشه دوم مجموع مربعات خطا[21] (RMSE) می‌باشد. مقادیر به دست آمده برای این پارامترها در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): مقادیر پارامترهای مدل NBTI برای یک افزاره MOSFET سه گیتی

پارامتر	مقدار
E_0 (V/m)	2.3×10^{8}
D_0 (m^2/s)	2.71×10^{-12}
E_a (eV)	0.45
K_{NBTI} ($C^{-1/3}m^{-5/3}$)	9.9×10^{16}

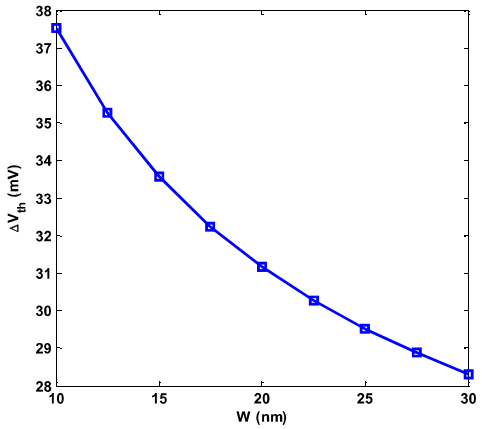


شکل (۴): تغییرات زمانی افزایش ولتاژ آستانه در اثر NBTI در افزاره‌ی MOSFET سه‌گیتی



شکل (۵): تغییرات توان زمان مؤثر در مدل NBTI نسبت به تغییرات عرض بدنه

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]



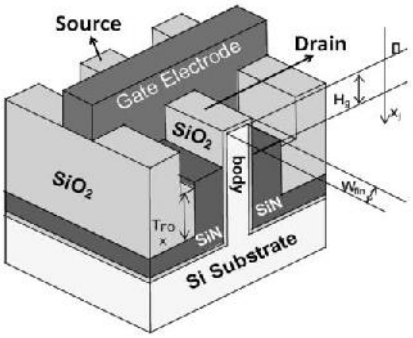
شکل (۶): افزایش اندازه تغییرات ولتاژ آستانه در مدل NBTI نسبت به تغییرات عرض بدنه

شکل (۴) تغییرات زمانی افزایش ولتاژ آستانه در اثر NBTI را در افزاره MOSFET سه‌گیتی ذکر شده، با اعمال ولتاژ گیت ۱/۵- ولت و در دمای ۱۲۵ درجه سانتیگراد نشان می‌دهد. توان زمان در نمودار افزایش ولتاژ آستانه در شکل (۴)، برابر ۰/۲۵ است که مقداری بیش از ۰/۱۶ که توان زمان مورد انتظار برای نفوذ مولکول‌های هیدروژن در افزاره‌های MOSFET مسطح است، می‌باشد. دلیل این افزایش توان، وجود گوشه‌ها و نفوذ دوبعدی مولکول‌های هیدروژن در طول آن‌هاست که باعث ایجاد مؤلفه دومی در رابطه‌ی (۱۲) می‌شود که سبب تولید توان‌های بالاتری از زمان بین ۰/۱۶ تا ۰/۳۳ در این رابطه می‌شود. بنابراین اگر توان زمان مؤثر (n) را در این رابطه به صورت $\Delta V_{th} \propto t^n$ تعریف کنیم، وجود این مؤلفه‌ی دوم باعث افزایش توان زمان مؤثر می‌شود و میزان این افزایش بستگی به بزرگی ضرایب توان‌های مختلف زمان در این رابطه یعنی ابعاد بدنه افزاره دارد. با کاهش عرض و ارتفاع بدنه، ضریب این مؤلفه و در نتیجه اثر گوشه‌ها درمقابل سه گیت قابل ملاحظه‌تر شده و توان زمان مؤثر مطابق شکل (۵) افزایش می‌یابد. افزایش توان زمان مؤثر سبب افزایش میزان تغییرات پارامترهای افزاره در اثر NBTI می‌شود که این اثر در شکل (۶) نشان داده شده است.

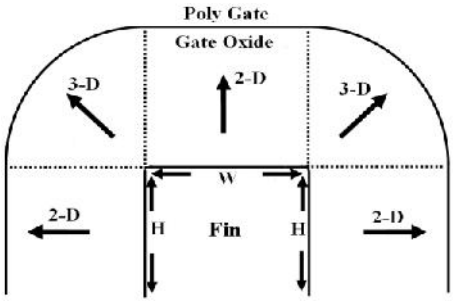
۳- پدیده‌ی HCI در افزاره‌های FinFET توده

۳-۱- مدل‌سازی پدیده HCI

پدیده HCI مهمترین عامل فرسایش در ترانزیستورهای کانال N می‌باشد. دلیل بروز این پدیده حرکت حامل‌های پرانرژی در میدان قوی سمت درین در ناحیه کاری اشباع ترانزیستور می‌باشد. در اثر یونیزه شدن برخوردی[۲۲]، زوج الکترون حفره‌هایی توسط این حامل‌های پرانرژی در سمت درین ایجاد می‌شوند. حفره‌های تولید شده در بستر[۲۳] جاری می‌شوند و باعث ایجاد جریان بستر می‌شوند. الکترون‌های تولید شده می‌توانند باعث افزایش جریان درین شوند و در صورت ورود به اکسید، جریان گیت را پدید آورند. بعضی از این الکترون‌های پرانرژی تولید شده به سمت فصل مشترک سیلیکون و اکسید حرکت می‌کنند و تعدادی از آنها می‌توانند از سد انرژی سطح عبور کنند و در صورت نفوذ به داخل اکسید، باعث شکسته شدن پیوندهای Si-H و SiO_2 و در نتیجه تولید بارهای اکسید و تله‌های فصل مشترک شوند [۲۳]. برای مدل کردن میزان تله‌های تولید شده در اثر HCI نیز همانند NBTI از مدل R-D استفاده شود و تفاوت در آن است که در پدیده HCI نفوذ می‌تواند در جهت کانال نیز رخ دهد و بنابراین در ترانزیستور MOSFET مدل کردن HCI نیاز به حل دو بعدی معادلات R-D دارد [۲۴]. ساختار یک افزاره‌ی FinFET توده در شکل (۷) نشان داده شده است [۲۳]. در اثر پدیده HCI نفوذ در جهت کانال نیز رخ می‌دهد و بنابراین در اثر این تنش نفوذ مطابق شکل (۸) در سه گیت به صورت دو بعدی و در گوشه‌ها به صورت سه بعدی خواهد بود. بنابراین با استفاده از روابط (۷) تا (۹) میزان تله‌های تولید شده در اثر HCI با استفاده از رابطه‌ی (۱۵) برحسب چگالی اتم‌های هیدروژن به دست می‌آید.



شکل (۷): ساختار یک افزاره FinFET توده‌ی سه بعدی [۲۳]



شکل (۸): یک افزاره FinFET توده و مسیر نفوذ هیدروژن به سمت گیت در پنج ناحیه از این افزاره در اثر HCI

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

$$N_{it}=\frac{1}{(W+2H)L}\left\{\frac{1}{4}\int_0^{\sqrt{D_H t}}N_H\left(1-\frac{r}{\sqrt{D_H t}}\right)2\pi r W dr+\right.$$
$$\frac{1}{2}\int_0^{\sqrt{D_H t}}N_H\left(1-\frac{r}{\sqrt{D_H t}}\right)2\pi r H dr+$$
$$\left.\frac{1}{4}\int_0^{\sqrt{D_H t}}N_H\left(1-\frac{r}{\sqrt{D_H t}}\right)4\pi r^2 dr=\right.$$
$$N_H\left[\frac{\pi(D_H t)}{12L}+\frac{\pi(D_H t)^{(3/2)}}{12L(W+2H)}\right] \qquad (۱۵)$$

با استفاده از روابط (۴) و (۱۵) میزان تله‌های تولید شده در اثر HCI از رابطه‌ی (۱۶) به دست می‌آید.

$$N_{it}=\left(\frac{k_F N_{\cdot}}{k_R}\right)\left[\frac{\pi\left(D_H t\right)}{۱۲L}+\frac{\pi\left(D_H t\right)^{(۳/۲)}}{۱۲L\left(W+۲H\right)}\right]^{(۱/۲)} \qquad (۱۶)$$

$$k_F \propto B\sqrt{Q_i}e^{\left(-\frac{\phi_{it}}{q\lambda E_m}\right)}e^{\frac{E_{ox}}{E_{\cdot}}} \qquad (۱۷)$$

در رابطه‌ی (۱۷)، λ طول پویش آزاد[۲۴] الکترون‌های پرانرژی، E_m φ_{it}/qE_m مسافتی است که یک الکترون باید در میدان بپیماید تا انرژی لازم برای ایجاد یک تله φ_{it} را به دست آورد و بنابراین $e^{(-\varphi it/q\lambda Em)}$ احتمال این است که یک الکترون این مسافت را بپیماید بدون اینکه متحمل برخوردی شود. E_m بیشینه میدان افقی در کانال می باشد که از رابطه زیر به دست می آید.

$$E_m \approx \frac{V_d-\eta V_{dsat}}{l} \qquad (۱۸)$$

η پارامتر بدون بعدی است که مقداری بین صفر و یک دارد و برای مدل‌سازی اثر کانال کوتاه به کار می‌رود. همچنین l طول مشخصه افزاره است و برای افزاره FinFET توده برابر $[(\varepsilon_{Si}/\varepsilon_{ox})(HW/(W+2H))t_{ox}]^{0.5}$ (t_{ox} ضخامت اکسید و W و H عرض و ارتفاع فین) می‌باشد. با استفاده از نتایج تجربی برای یک FinFET توده با طول گیت ۸۰ نانومتر، ضخامت اکسید ۱/۵ نانومتر و با فینی به عرض ۴۰ نانومتر و ارتفاع ۱۰۰ نانومتر[۲۵]، مقدار η برابر ۰/۴۲ به دست می‌آید.

بنابراین میزان تله‌های تولید شده در اثر HCI از رابطه‌ی (۱۹) به دست می‌آید.

$$N_{it}=K_{HCI}\left[\sqrt{Q_i}e^{\left(\frac{\varphi_{it}}{q\lambda E_m}\right)}e^{\left(\frac{E_{ox}}{E_0}\right)}\right]\left[\frac{\pi D_H t}{12L}+\frac{\pi(D_H t)^{(3/2)}}{12L(W+2H)}\right]^{(1/2)} \qquad (۱۹)$$

طول عمر افزاره معمولا به زمانی گفته می‌شود که تغییرات جریان روشن افزاره برابر ۱۰٪ مقدار اولیه آن شود [۲۵]، بنابراین برای تخمین طول عمر افزاره نیاز به مدلی تحلیلی برای جریان روشن افزاره در ناحیه اشباع داریم. برای این کار از مدل توان n ام [۲۶] استفاده می‌کنیم. در این مدل جریان روشن افزاره در ناحیه‌ی اشباع از رابطه‌ی (۲۰) تبعیت می‌کند.

$$I_{Dsat}=\frac{W_{eff}}{L_{eff}}B(V_{gs}-V_{th})^n \qquad (۲۰)$$

در رابطه‌ی (۲۰) B و n پارامترهایی هستند که از نتایج عملی به دست می‌آیند. افزاره FinFET دارای یک گیت بالایی و دو گیت کناری می‌باشد که در جهت‌های مختلف بلور سیلیکون ساخته شده‌اند. معمولاً گیت بالایی در جهت {100} و گیت‌های کناری در جهت {110} بلور سیلیکون ساخته می‌شوند. نسبت قابلیت حرکت الکترون در جهت بلوری {100} نسبت به جهت {110} تقریباً برابر ۱/۶۷ می‌باشد [۲۷]. برای سادگی ما این نسبت قابلیت حرکت را در عرض مؤثر اعمال می کنیم و بنابراین رابطه‌ی (۲۰) می‌تواند به صورت رابطه‌ی (۲۱) بازنویسی شود:

$$I_{Dsat}=\frac{(1.67W_{Fin}+2H_{Fin})}{L_g}B(V_{gs}-V_t)^n \qquad (۲۱)$$

با استفاده از روابط (۱۹) و (۲۱)، رابطه‌ی میان کاهش جریان اشباع افزاره و میزان تله‌های تولید شده در اثر HCI برابر خواهد بود با:

$$\frac{\Delta I_{Dsat}}{I_{Dsat}}=-\frac{nqN_{IT}}{C_{ox}\left(V_{gs}-V_{th}\right)} \qquad (۲۲)$$

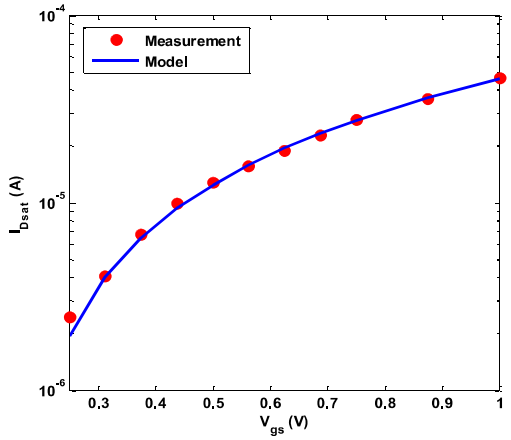
۳-۲- نتایج و بحث

مقادیر به دست آمده از نتایج تجربی برای پارامترهای B و n در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲): مقادیر پارامترهای مدل جریان روشن افزاره FinFET توده در ناحیه اشباع

پارامتر	مقدار
B	1.75×10^{-5}
n	1.45

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

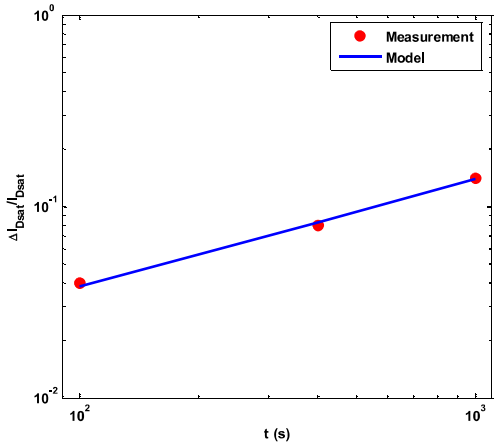


شکل (۹): مشخصه جریان درین به ولتاژ گیت برای افزاره FinFET توده (V_{ds} = 1V, T=25 C)

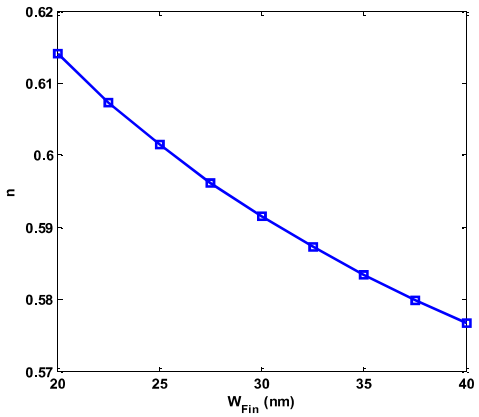
شکل (۹) مشخصه جریان درین به ولتاژ گیت را برای افزاره FinFET توده ذکر شده نشان می‌دهد. رابطه‌ی (۱۹) دارای چهار پارامتر تطبیقی K_{HCI}، E_0، D_0 و E_a می‌باشد. مقادیر به دست آمده برای این پارامترها در جدول (۳) آمده است. شکل (۱۰) کاهش جریان اشباع افزاره در اثر HCI را برای افزاره FinFET توده ذکر شده در قسمت قبل نشان می‌دهد. توان زمان در نمودار تغییرات جریان اشباع افزاره FinFET توده در شکل (۱۰)، برابر ۰/۵۶۵ است که مقداری بیش از ۰/۵ که توان زمان مورد انتظار برای اثر HCI در افزاره‌های MOSFET مسطح است، می‌باشد. دلیل این افزایش توان، همانگونه که در بخش دوم توضیح داده شد، وجود گوشه‌های افزاره و نفوذ سه‌بعدی هیدروژن در طول آنها می‌باشد. شکل (۱۱) کاهش توان زمان مؤثر و شکل (۱۲) کاهش تغییرات جریان اشباع نسبت به افزایش ابعاد فین را در یک افزاره FinFET توده سه‌گیتی نشان می‌دهد.

جدول (۳): مقادیر پارامترهای مدل میزان تله‌های تولید شده در اثر HCI درافزاره FinFET توده

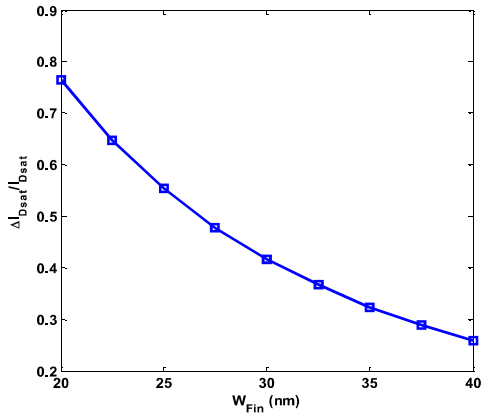
پارامتر	مقدار
E_0 (V/m)	5.1×10^{8}
D_0 (m^2/s)	2.2×10^{-12}
E_a (eV)	0.3
K_{HCI} ($C^{-1/3}m^{-5/3}$)	4.7×10^{20}



شکل (۱۰): تغییرات زمانی کاهش جریان اشباع افزاره در اثر HCI (V_{ds} = 1V, V_{gs}-V_{th} = 1V, T = 25)



شکل (۱۱): تغییرات توان زمان در مدل HCI نسبت به تغییرات عرض فین

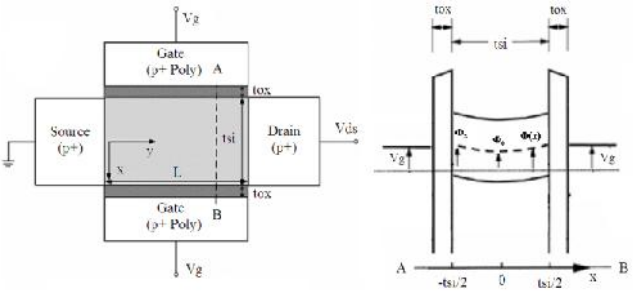


شکل (۱۲): نتایج حاصل از مدل برای تغییرات جریان اشباع افزاره در اثر HCI نسبت به تغییرات عرض فین (L_g = 65 nm, V_{ds} = 1V, V_{gs}- V_{th} = 1V, T = 25, t = 1000)

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

۴- اثر بدنه شناور روی پدیده NBTI در افزاره‌های MOSFET دوگیتی

برای بهره گیری از مزایای افزاره‌های MOSFET دوگیتی، از بدنه بدون آلایش[۲۵] و یا کم آلائیده شده‌ی نازک ($N_A \leq 10^{16}\ cm^{-3}$) در این افزاره‌ها استفاده می‌شود[3]. استفاده از این نوع بدنه باعث قابلیت تحرک بیشتر حامل‌ها در بدنه و همچنین کم شدن اثرات آلاینده تصادفی می‌شود [۲۸]. یک افزاره دوگیتی متقارن کانال P و دیاگرام نوارهای انرژی آن در ناحیه‌ی وارونگی در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



شکل (۱۳) : افزاره دو گیتی متقارن کانال P و دیاگرام باندهای انرژی آن در ناحیه وارونگی

در افزاره‌های MOSFET معمولی الکترون تولیدی در اثر پدیده NBTI از طریق بستر خارج می‌شود. ولی در افزاره‌های دارای بدنه‌ی شناور از جمله افزاره های دوگیتی این الکترون‌ها در بدنه جمع می‌شوند و سبب کاهش ولتاژ بدنه و در نتیجه کاهش میدان اکسید و کاهش اثر NBTI در این افزاره‌ها نسبت به افزاره‌های دارای اتصال بدنه می‌شوند [۲۹].

در این بخش با استفاده از روش حل یک بعدی معادله پواسون[۲۶] در ناحیه‌ی وارونگی یک افزاره MOSFET دو گیتی کانال P با بدنه بدون آلایش و با بایاس سورس و درین صفر، اثر الکترون های تولیدی در اثر پدیده NBTI را روی توزیع پتانسیل این افزاره بررسی و مدل می‌کنیم.

۴-۱- اثر NBTI در افزاره MOSFET دو گیتی با بدنه شناور

با استفاده از روابط (۷)، (۱۳) و (۱۴)، میزان تله‌های تولیدی در اثر NBTI از رابطه (۲۳) به‌دست می‌آید.

$$N_{it} = AQ_i^{2n} e^{\left(\frac{4nE_{OX}}{E_0}\right)} \left(D e^{\left(-\frac{E_a}{KT}\right)} \right)^n \qquad (۲۳)$$

بنابراین با توجه به اینکه به ازای شکستن هر پیوند Si-H یک الکترون تولید می‌شود، چگالی حجمی الکترون‌های تولیدی در بدنه یک افزاره دوگیتی برابر رابطه (۲۴) خواهد بود.

$$n_{it} = \frac{2N_{it}}{t_{si}} = \frac{2A}{t_{si}} Q_i^{2n} e^{\left(\frac{4nE_{OX}}{E_0}\right)} \left(D e^{\left(-\frac{E_a}{KT}\right)} \right)^n \qquad (۲۴)$$

که در این رابطه t_{si} ضخامت بدنه در افزاره دو گیتی می‌باشد. در افزاره MOSFET دوگیتی با بدنه بدون آلایش بار وارونگی و میدان اکسید مطابق روابط (۲۵) و (۲۶) به دست می‌آیند.

$$Q_i = \varepsilon_{si} \frac{d\phi}{dx}\left(x = \frac{t_{si}}{2} \right) \qquad (۲۵)$$

$$E_{ox} = \frac{V_g - \phi_s}{t_{ox}} \qquad (۲۶)$$

در رابطه‌ی (۲۶)، V_g برابر V_{GS}-Φ_{ms} می‌باشد، که V_{GS} اختلاف ولتاژ بین گیت و سورس و Φ_{ms} اختلاف توابع کار[۲۷] ماده سازنده گیت و نیمه‌هادی بدنه می‌باشد. Φ_sپتانسیل سطحی است که از حل معادله‌ی پواسون یک بعدی به دست می آید. با فرض زمین بودن سورس و درین و بنابراین صرف نظر از تغییرات پتانسیل در جهت کانال، معادله‌ی پواسون یک بعدی برای این افزاره در جهت x برابر رابطه (۲۷) خواهد بود.

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon_{si}} \qquad (۲۷)$$

$$\rho(x) = q(N_D - n - N_A + p) \qquad (۲۸)$$

در رابطه‌ی (۲۸)، N_D و N_A چگالی ناخالصی‌های دهنده و گیرنده در بدنه و n و p چگالی حامل‌های مثبت و منفی در بدنه هستند که مطابق با توزیع بولتزمان، در هر نقطه در بدنه به دست می‌آیند. در افزاره MOSFET دوگیتی، بدنه بدون آلایش و یا دارای آلایش بسیار کم می‌باشد، بنابراین می‌توان از میزان N_D-N_A در بدنه صرفنظر کرد و مقدار الکترون‌های موجود در بدنه را برابر با الکترون‌های تولیدی در اثر شکستن باندهای Si-H در فصل مشترک بدنه با دو گیت فرض کرد. بنابراین مطابق با توزیع بولتزمان، چگالی حامل‌ها در هر نقطه از بدنه می‌تواند طبق روابط (۲۹) و (۳۰) بر حسب پتانسیل بدنه در آن نقطه بیان شود.

$$n = n_{it} e^{\frac{q\varphi}{KT}} \qquad (۲۹)$$

$$p = \frac{n_i^2}{n_{it}} e^{-\frac{q\varphi}{KT}} \qquad (۳۰)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

از آنجائیکه اثر NBTI فقط در ناحیه‌ی وارونگی که بایاس منفی شدید به ترانزیستور کانال P اعمال می‌شود تأثیر گذار است و در این ناحیه حفره‌ها حامل‌های غالب هستند، می‌توان معادله‌ی پواسون را به صورت رابطه (۳۱) نوشت.

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{q}{\varepsilon_{si}}\frac{n_i^2}{n_{it}}e^{\frac{q\phi}{KT}} \qquad (۳۱)$$

با استفاده از حل معادله پواسون برای MOSFET دوگیتی متقارن [۳۰]، به رابطه‌ی (۳۲) برای توزیع پتانسیل در بدنه می‌رسیم.

$$\phi(x) = -\frac{kT}{q}\ln\left[\frac{p_0 n_{it}}{n_i^2}\cos^{-2}\left[\sqrt{\frac{q^2 p_0}{2kT\varepsilon_{si}}}x\right]\right] \qquad (۳۲)$$

در رابطه‌ی (۳۲)، p_0 چگالی حفره‌ها در وسط بدنه $(x=0)$ می‌باشد. پتانسیل سطحی یعنی $\Phi(x=t_{si}/2)$ و میدان الکتریکی در فصل مشترک برابر روابط (۳۳) و (۳۴) خواهد بود.

$$\phi_S = -\frac{kT}{q}\ln\left[\frac{2p_0 n_{it}}{n_i^2}\cos^{-2}\left[\sqrt{\frac{q^2 p_0}{2kT\varepsilon_{si}}}\frac{t_{si}}{2}\right]\right] \qquad (۳۳)$$

$$E_S = -\varepsilon_{si}\frac{d\phi}{dx}\left(\frac{t_{si}}{2}\right) = \sqrt{\frac{2p_0 kT}{\varepsilon_{si}}}\tan\left[\sqrt{\frac{q^2 p_0}{2kT\varepsilon_{si}}}\frac{t_{si}}{2}\right] \qquad (۳۴)$$

با استفاده از قانون گوس و اعمال آن به فصل مشترک سیلیکون و اکسید، به رابطه‌ی مرزی (۳۵) برای یافتن p_0 و در نتیجه آن توزیع پتانسیل در بدنه می‌رسیم.

$$C_{ox}\left(V_g - \phi_s\right) = \varepsilon_{si}\left.\frac{d\phi}{dx}\right|_{x=\frac{t_{si}}{2}} \qquad (۳۵)$$

برای سادگی در حل معادلات، پارامترهای کمکی (۳۶) تا (۳۹) را تعریف می‌کنیم.

$$\lambda = \sqrt{\frac{q^2 n_i}{2\varepsilon_{si}KT}}\frac{t_{si}}{2} \qquad (۳۶)$$

$$\gamma = \frac{1}{\lambda C_{ox}}\frac{q}{KT}\sqrt{2n_i\varepsilon_{si}KT} \qquad (۳۷)$$

$$\alpha = \lambda\sqrt{\frac{p_0}{n_i}} \qquad (۳۸)$$

$$V_0 = \frac{t_{ox}E_0}{4n} \qquad (۳۹)$$

با جایگذاری روابط (۳۶) تا (۳۹) در روابط (۲۵) و (۲۴)، چگالی بارهای وارونگی و الکترون‌های تولیدی برابر روابط (۴۰) و (۴۱) خواهند بود.

$$Q_i = -\varepsilon_{si}\left.\frac{d\phi}{dx}\right|_{x=\frac{t_{si}}{2}} = \frac{C_{ox}KT}{q}\gamma\alpha\tan(\alpha) \qquad (۴۰)$$

$$n_{it} = K_t\left(\alpha\tan(\alpha)\right)^{2n}e^{\frac{\phi_s - V_g}{V_0}} \qquad (۴۱)$$

که در رابطه‌ی (۴۱)

$$K_t = \frac{2A\left(D_0 e^{\left(\frac{-E_a}{KT}\right)}t\right)^n}{t_{si}}\left(C_{ox}\frac{KT}{q}\gamma\right)^{2n} \qquad (۴۲)$$

با جایگذاری روابط به دست آمده در (۳۳) و (۳۵)، به دستگاه معادلاتی شامل دو معادله (۴۳) و (۴۴) و دو مجهول α و Φ_s است خواهیم رسید.

$$\phi_s = -\frac{KT}{q}\ln\left\{\frac{K_t}{n_i}\left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2\left(\alpha\tan(\alpha)\right)^{2n}e^{\frac{\phi_s - V_g}{V_0}}\cos^{-2}(\alpha)\right\} \qquad (۴۳)$$

$$\phi_s - V_g = \frac{KT}{q}\gamma\alpha\tan(\alpha) \qquad (۴۴)$$

با جایگذاری رابطه‌ی (۴۴) در (۴۳)، به معادله‌ی غیر خطی (۴۵) برحسب α می‌رسیم.

$$\begin{aligned}&(2n+2)\ln(\alpha) + 2n\ln(\tan(\alpha)) - 2\ln(\cos(\alpha)) + \\ &\gamma\left(\frac{KT}{q}\frac{1}{V_0}+1\right)\alpha\tan(\alpha) + \left[\ln\left(\frac{2A}{n_i\lambda^2}\right)+\frac{qV_g}{KT}\right] = 0\end{aligned} \qquad (۴۵)$$

معادله‌ی غیرخطی (۴۵) باید به صورت عددی حل شود. بعد از حل عددی این معادله مقدار α و با جایگذاری آن در معادله‌ی (۳۸) مقدار p_0 و با استفاده از آن پتانسیل سطحی، چگالی بارهای وارونگی، میدان اکسید و در نتیجه چگالی تله‌های تولیدی به دست می‌آیند.

۴-۲-اثر NBTI در افزاره MOSFET دو گیتی بدون اثر الکترون‌های تولید شده

در این قسمت فرض کنیم که به طریقی با اتصال بدنه بتوان الکترون‌های تولید شده را از بدنه خارج کرد. در این حالت میزان بارهای فصل مشترک برابر با مجموع بار حفره‌های ناحیه وارونگی Q_i و بار تله‌های تولید شده در اثر NBTI یعنی Q_{it} است و معادله‌ی پواسون و شرط مرزی به دست آمده از قانون گوس مشابه روابط (۴۶) و (۴۷) می‌باشند.

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{q}{\varepsilon_{si}}n_i e^{\frac{q\phi}{KT}} \qquad (۴۶)$$

$$C_{ox}\left(\phi_s - V_g\right) = -\varepsilon_{si}\left.\frac{d\phi}{dx}\right|_{x=\frac{t_{si}}{2}} = Q_i + Q_{it} \qquad (۴۷)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

Q_{it} با استفاده از رابطه‌ی (۲۴) به صورت رابطه (۴۸) به‌دست می‌آید.

$$Q_{it} = qN_{it} = BQ_i^{2n} e^{\left(\frac{\phi_s - V_g}{V_0}\right)} = BQ_i^{2n} e^{\left(\frac{1}{V_0}\frac{KT}{q}\gamma\alpha\tan(\alpha)\right)} \quad (۴۸)$$

که در رابطه‌ی (۴۸)

$$B = qA\left(D_0 e^{\left(\frac{E_a}{KT}\right)} t\right)^n \quad (۴۹)$$

با جایگذاری روابط (۴۰) و (۴۸) در رابطه‌ی (۴۷) به معادله (۵۰) خواهیم رسید.

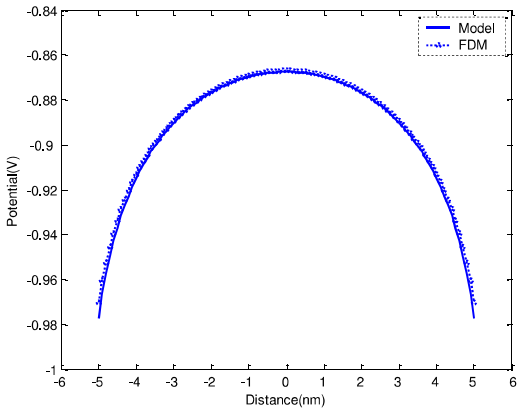
$$Q_i + BQ_i^{2n} e^{\left(\frac{1}{V_0}\frac{KT}{q}\gamma\alpha\tan(\alpha)\right)} - \frac{C_{ox}KT\gamma}{q}\alpha\tan(\alpha) = 0 \quad (۵۰)$$

۴-۳- نتایج و بحث

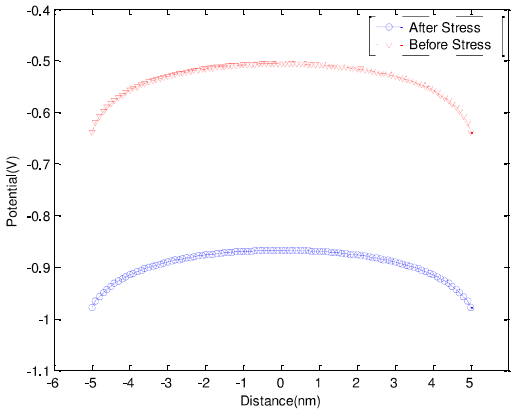
با فرض نفوذ هیدروژن به صورت مولکولی (n=0.16) و استفاده از پارامترهای مدل NBTI [۲۱]، معادله‌ی (۴۵) به صورت عددی حل و مقدار α برای مقادیر مختلف پارامترهای افزاره و بایاس اعمالی به گیت به دست آمد. برای تأیید مدل ارائه شده و روش حل معادله پواسون، از روش عددی FDM[۲۸] [۳۱] برای حل دقیق معادله پواسون همراه با اثر الکترون‌ها و تله‌های تولیدی استفاده شده است.

شکل (۱۴) نتایج حاصل از مدل و روش عددی را برای توزیع پتانسیل در بدنه یک افزاره MOSFET دوگیتی کانال P با گیت پلی سیلیکون نوع P^+، طول گیت ۴۵ نانومتر، ضخامت اکسید ۱/۵ نانومتر و ضخامت بدنه ۱۰ نانومتر با در نظر گرفتن اثر NBTI با ولتاژ گیت ۱- ولت، دمای کاری ۲۵ درجه و بعد از مدت زمان ۱۰۰۰ ثانیه را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، نتایج حاصل از مدل و روش حل عددی تطابق بسیار خوبی باهم دارند.

در شکل (۱۵) توزیع پتانسیل بعد از گذشت ۱۰۰۰ ثانیه از شروع اعمال تنش NBTI، با توزیع پتانسیل اولیه قبل از اعمال تنش مقایسه شده‌اند. همانگونه که در شکل دیده می‌شود، به دلیل بروز پدیده NBTI و در نتیجه تجمع الکترون‌ها در بدنه ، پتانسیل بدنه کاهش می‌یابد که این امر سبب کاهش میدان الکتریکی در فصل مشترک سیلیکون و اکسید و در نتیجه کاهش تولید تله در فصل مشترک در اثر NBTI می‌شود. میزان کاهش میدان در فصل مشترک بعد از گذشت ۱۰۰۰ ثانیه از شروع اعمال تنش NBTI نسبت به میزان میدان قبل از اعمال تنش در شکل (۱۶) دیده می‌شود.



شکل (۱۴): نتایج حاصل از مدل و روش عددی برای توزیع پتانسیل در بدنه یک افزاره MOSFET دوگیتی



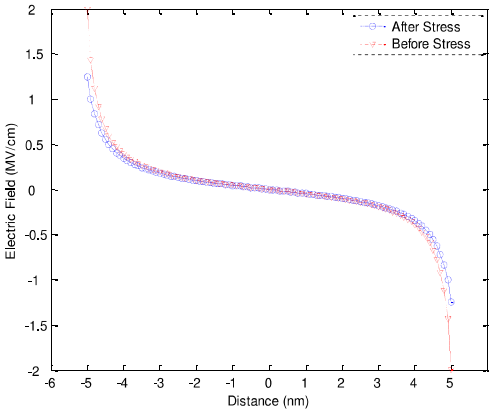
شکل (۱۵): مقایسه توزیع پتانسیل در بدنه بعد از گذشت ۱۰۰۰ ثانیه از شروع اعمال تنش NBTI با توزیع پتانسیل پیش از اعمال تنش

شکل (۱۷) میزان تله‌های تولید شده در اثر NBTI را در یک افزاره دو گیتی با مشخصات ذکر شده و با اعمال تنش ۱-، ۱/۲- و ۱/۴- ولت به گیت و در دمای کاری ۲۵ درجه سانتیگراد نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است، میزان این تله‌ها با افزایش ولتاژ گیت به دلیل افزایش میدان اکسید و چگالی بارهای وارونگی افزایش می‌یابد.

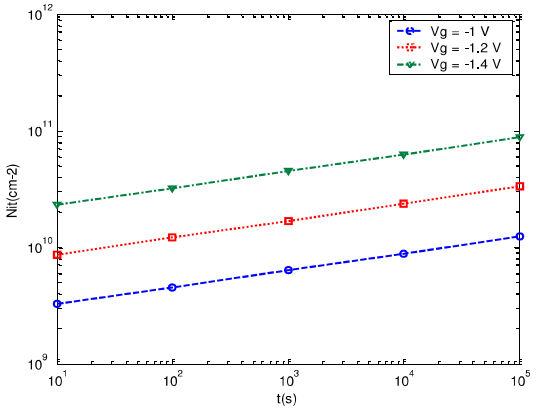
شکل (۱۸) کاهش میدان اکسید در اثر تجمع الکترون‌ها در بدنه را در سطح یک افزاره دو گیتی با ضخامت بدنه ۱۰ نانومتر و ضخامت اکسید ۱/۵ نانومتر نسبت به گذشت زمان و با اعمال ولتاژهای مختلف به گیت نشان می‌دهد. با گذشت زمان و افزایش تله‌های تولید شده و در نتیجه افزایش الکترون‌های جمع شده در بدنه، ولتاژ بدنه کاهش می‌یابد و در نتیجه همانطور که

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

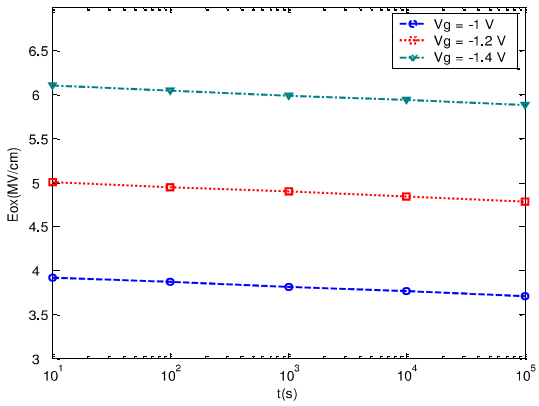
در شکل دیده می‌شود این کاهش ولتاژ سبب کاهش میدان اکسید می‌شود. از آنجائیکه نرخ تولید تله در اثر NBTI مطابق رابطه (۱۳) وابستگی نمایی به میدان اکسید دارد، کاهش میدان اکسید نرخ تولید تله در فصل مشترک را کاهش می‌دهد.



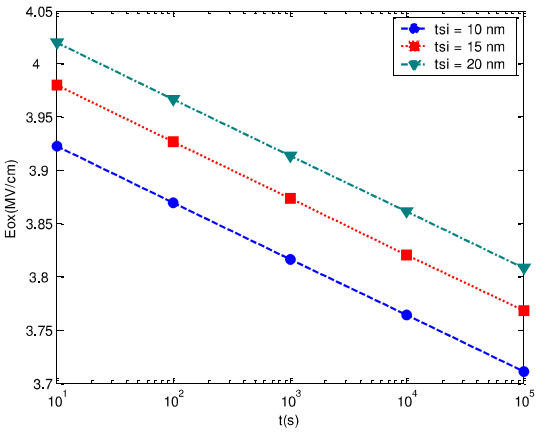
شکل (۱۶): مقایسه توزیع میدان در بدنه بعد از گذشت ۱۰۰۰ ثانیه از شروع اعمال تنش NBTI با توزیع میدان پیش از اعمال تنش



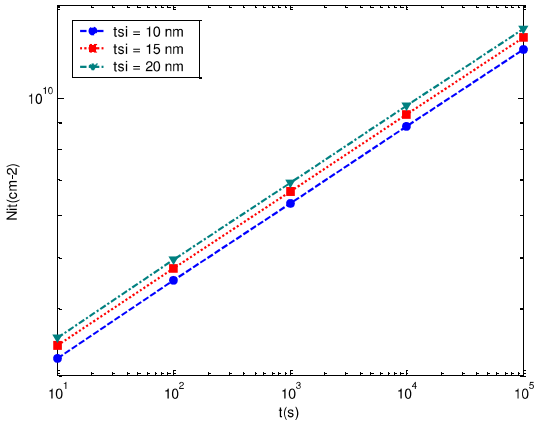
شکل (۱۷): میزان تله‌های تولید شده در اثر NBTI به ازای ولتاژهای گیت متفاوت



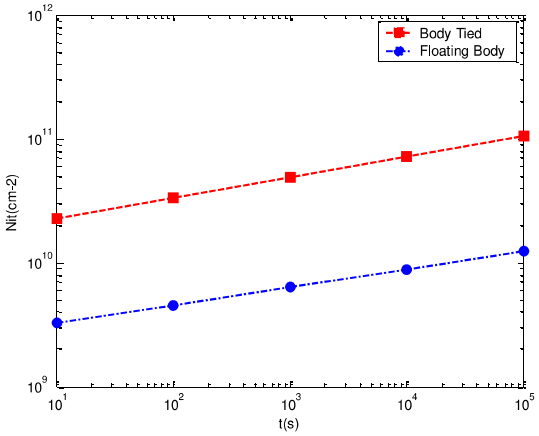
شکل (۱۸): کاهش میدان اکسید در اثر تجمع الکترون‌ها در بدنه و به ازای اعمال ولتاژهای گیت مختلف



شکل (۱۹): کاهش میدان اکسید در اثر تجمع الکترون‌ها در بدنه برای ضخامت‌های بدنه ۱۰، ۱۵ و ۲۰ نانومتر



شکل (۲۰): میزان تله‌های تولید شده در اثر NBTI نسبت به گذشت زمان برای ضخامت‌های بدنه ۱۰، ۱۵ و ۲۰ نانومتر



شکل (۲۱): مقایسه میزان تله‌های تولید شده در اثر NBTI در یک افزاره MOSFET دو گیتی با بدنه‌ی شناور با میزان تله‌های تولید شده در اثر NBTI در افزاره‌ای با همین مشخصات ولی با فرض خروج الکترون‌ها از بدنه

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

شکل (۱۹) کاهش میدان اکسید در اثر تجمع الکترون‌ها در بدنه را نسبت به گذشت زمان برای افزاره‌های MOSFET دوگیتی با مشخصات ذکر شده و ضخامت‌های بدنه ۱۰، ۱۵ و ۲۰ نانومتر نشان می‌دهد. در افزاره‌هایی با ضخامت بدنه کمتر، به علت حجم بدنه‌ی کوچکتر، چگالی حجمی الکترون‌های تولید شده بیشتر بوده و در نتیجه همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، شاهد کاهش بیشتری در میدان اکسید خواهیم بود. کاهش بیشتر میدان اکسید در افزاره‌های دارای بدنه‌ی نازک‌تر سبب کاهش بیشتر نرخ تولید تله در اثر NBTI می‌شود و بنابراین در افزاره‌ی دارای بدنه‌ی نازک‌تر همانگونه که در شکل (۲۰) دیده می‌شود، میزان تله‌های تولیدی کمتر خواهد بود. کاهش چگالی سطحی تله‌ها سبب کاهش میزان الکترون‌ها و در نتیجه کاهش چگالی حجمی آنها می‌شود و باعث می‌شود تغییرات میدان اکسید کمتر شود و در نتیجه تغییرات چگالی سطحی تله‌ها کوچکتر می‌شود. بنابراین همانگونه که شرح داده شد در این حالت یک سیستم بازخوردی[۲۹] روی میزان چگالی سطحی تله‌ها اثر می‌گذارد و با وجود اینکه با کاهش ضخامت بدنه، چگالی سطحی تله‌ها کم می‌شود، این تغییرات همانگونه که درشکل (۲۰) دیده می‌شود بسیار کم می‌باشد.

معادله‌ی غیرخطی (۵۰) باید به صورت عددی حل شود. با فرض نفوذ هیدروژن به صورت مولکولی (n=0.16)، و استفاده از پارامترهای مدل NBTI [۲۱]، این معادله را به صورت عددی حل و مقدار Q_i را برای مقادیر مختلف پارامترهای افزاره و بایاس اعمالی به گیت به دست می‌آوریم. با به دست آمدن بارهای وارونگی و جایگذاری آن در رابطه (۴۸)، چگالی تله‌های تولید شده در اثر NBTI به دست می‌آید.

شکل (۲۱) میزان تله‌های تولید شده در اثر پدیده‌ی NBTI تحت تنش ۱- ولت در یک افزاره MOSFET دو گیتی با بدنه‌ی شناور و با مشخصات ذکر شده در قسمت قبل را با میزان تله‌های تولید شده در اثر NBTI در افزاره‌ای با همین مشخصات ولی با فرض خروج الکترون‌ها از بدنه مقایسه می‌کند. همانطور که در شکل نشان داده شده است، الکترون‌های جمع شده در بدنه‌ی شناور سبب می‌شوند که میدان الکتریکی اکسید کاهش یابد و بنابراین میزان تله‌های تولید شده در اثر NBTI در این افزاره نسبت به حالتی که این الکترون‌ها از بدنه خارج شوند کمتر می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده مدل R-D چندبعدی که وابسته به ابعاد و شکل افزاره می‌باشد، مدلی برای میزان تله‌های تولید شده در اثر NBTI در یک MOSFET سه‌گیتی و میزان تله‌های تولید در اثر HCI در افزاره‌های FinFET توده ارائه شد. سپس پارامترهای تطبیقی موجود در مدل ها با استفاده از نتایج تجربی یافته شد و نتایج حاصل از مدل با نتایج تجربی مقایسه و وابستگی تغییرات توان زمان در مدل با ابعاد و شکل افزاره بررسی شد. نتایج حاصل نشان می‌داد که توان زمان در مدل NBTI و HCI برای افزاره‌های سه‌گیتی بیشتر از افزاره MOSFET مسطح می‌باشد. دلیل این افزایش توان وجود گوشه‌ها و نفوذ دوبعدی در طول آنهاست. با کاهش عرض و ارتفاع بدنه، اثر گوشه‌ها درمقابل سه گیت قابل ملاحظه‌تر شده و توان زمان افزایش می‌یابد. افزایش توان زمان سبب فرسایش بیشتر این افزاره‌ها و افزایش میزان تغییرات پارامترهای آن نسبت به MOSFET مسطح می‌شود. همچنین در ادامه به بررسی و مدل‌سازی اثر بدنه شناور روی پدیده‌ی NBTI در افزاره‌های MOSFET دوگیتی با استفاده از حل معادله پواسون یک بعدی ابتدا با فرض تجمع الکترون‌های تولید شده در اثر NBTI در بدنه و اثر آنها در کاهش ولتاژ بدنه، و سپس با فرض خروج الکترون‌های تولید شده از بدنه و با در نظر گرفتن میزان تله‌های تولید شده در اثر NBTI به عنوان عاملی تأثیر گذار روی شرط مرزی و در نهایت مقایسه این دو حالت، پرداخته شد. بررسی نتایج حاصل نشان داد که در اثر تجمع الکترون‌ها در بدنه در اثر NBTI، پتانسیل بدنه کاهش می‌یابد که این امر سبب کاهش میدان الکتریکی اکسید می‌شود. بنابراین میزان تله‌های تولید شده در اثر NBTI در افزاره‌ی دارای بدنه شناور نسبت به افزاره‌ی دارای اتصال بدنه کمتر می‌شود و در نتیجه فرسایش کمتری را به دنبال دارد. همچنین بررسی این پدیده در افزاره‌هایی با ضخامت‌های بدنه متفاوت نشان می‌دهد که در افزاره‌های دارای بدنه نازک‌تر، به علت حجم کوچکتر بدنه و در نتیجه چگالی حجمی بیشتر الکترون‌های تولید شده، شاهد کاهش بیشتری در میدان اکسید خواهیم بود. این کاهش بیشتر میدان اکسید سبب کاهش بیشتر تولید تله در افزاره‌های دارای بدنه نازک‌تر می‌شود. کاهش تولید تله در این افزاره‌ها کاهش میزان الکترون‌ها و در نتیجه کاهش چگالی حجمی آنها را در پی دارد و باعث می‌شود تغییرات میدان اکسید کمتر شود و در نتیجه تغییرات چگالی سطحی تله‌ها کوچکتر می‌شود. بنابراین در

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

این حالت یک سیستم بازخوردی روی میزان چگالی سطحی تله‌ها اثر می‌گذارد و با وجود اینکه با کاهش ضخامت بدنه، چگالی سطحی تله‌ها کم می‌شود، این تغییرات بسیار کوچک می‌باشد.

مراجع

[1] Reddy, V., Krishnan, A. T., Marshall, A., Rodriguez, J., Natarajan, S., Rost, T., Krishnan, S., "Impact of negative bias temperature instability on digital circuit reliability," IEEE IRPS Proceedings, pp. 248-254, 2002.

[2] Krishnan, A. T., Reddy, V., Chakravarthi, S., Rodriguez, J., John, S., Krishnan, S., "NBTI impact on transistor and circuit: models, mechanisms and scaling effects [MOSFETs]," IEEE IEDM Technical Digest, pp. 349-352, 2003.

[3] Abadeer, W., Ellis, W., "Behavior of NBTI under AC dynamic circuit conditions," IEEE IRPS Proceedings, p. 17, 2003.

[4] Chen, Y., Zhou, J., Tedja, S., Hui, F., Oates, A. S., "Stress-induced MOSFET mismatch for analog circuits," IEEE Integrated Reliability Workshop Final Report, p. 41, 2001.

[5] Agostinelli, M., Lau, S., Pae, S., Marzolf, P., Muthali, H., Jacobs, S., "PMOS NBTI induced circuit mismatch in advanced technologies," IEEE IRPS Proceedings, p. 171, 2004.

[6] Ning, T. H., Cook, P. W., Dennard, R. H., Osburn, C. M., Schuster, S. E., Yu, H., "1 μm MOSFET VLSI Technology: Part IV-Hot electron design constraints," IEEE Trans. Electron Devices, vol.26, pp.346-353, 1979.

[7] Hu, C., Tam, S. C., Hsu, F. C., Ko, P. K., Chan, T. Y., Terrill, K. W., "Hot Electron Induced MOSFET Degradation-Model, Monitor and Improvement," J. Solid State Circuits, vol. 20(1), pp. 295-305, 1985.

[8] Chen, I., Choi, J. Y., Chan, T., Hu, C., "The Effect of Channel Hot-Carrier Stressing on Gate-oxide Integrity in MOSFETs," IEEE Trans Electron Devices, vol. 35(12), pp. 2253-2258, 1988.

[9] Li, E., Rosenbaum, E., Register, L. F., Tao, J., Fang, P., "Hot Carrier Induced Degradation in Deep Submicron MOSFETs at 100C," IRPS Proc. pp. 103-107, 2001.

[10] Li, E., Rosenbaum, E., Tao, J., Fang, P., "Projecting Lifetime of Deep Submicron MOSFETs," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 48(4), pp. 671-678, 2001.

[11] Abramo, A., Fiegna, C., Venturi, F., "Hot carrier effects in short MOSFETs at low applied voltages," J. Appl. Phys., vol.80, pp. 889-893, 1996.

[12] Miura, Y., Matukura, Y., "Investigation of Silicon-Silicon Dioxide Interface Using MOS Structure," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 5, p. 180, 1966.

[13] Entner, R., Modeling and Simulation of Negative Bias Temperature Instability, Ph.D. Thesis, Vienna University of Technology, April 2007.

[14] Kufluoglu, H., MOSFET degradation due to negative bias temperature instability(NBTI) and hot carrier injection(HCI) and its implications for reliability-aware VLSI design, Ph.D. Thesis, Purdue University, December 2007.

[15] Pantelides, S. T., Rashkeev, S. N., Buczko, R., Fleetwood, D. M., Schrimpf, R. D., "Reactions of hydrogen with Si − SiO2 interfaces," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 47, no. 6, pp. 2262–2268, Dec. 2000.

[16] Schroder, D. K., Babcock, J. A., "Negative bias temperature instability: Road to cross in deep submicron silicon semiconductor manufacturing," J. Appl. Phys., vol. 94, no. 1, pp. 1–18, Jul. 2003.

[17] Mahapatra, S., Alam, M. A., "A predictive reliability model for PMOS bias temperature degradation," in IEDM Tech. Dig., 2002. pp. 505–509.

[18] Jeppson, K. O., Svensson, C. M., "Negative bias stress of MOS devices at high electric fields and degradation of MNOS devices," J. Appl. Phys., vol. 48, no. 5, pp. 2004-2014, 1977.

[19] Alam, M. A., "A critical examination of the mechanics of dynamic NBTI for PMOSFETs," in IEDM Tech. Dig., 2003, pp. 14.4.1–14.4.4

[20] Kufluoglu, H., Alam, M. A., "Theory of interface-trap-induced NBTI degradation for reduced cross section MOSFETs," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 53, no. 5, pp. 1120-1130, May. 2006.

[21] Wang, W., Reddy, V., Krishnan, A. T., "Compact Modeling and Simulation of Circuit Reliability for 65-nm CMOS Technology," IEEE Trans. Device Mater. Reliab., vol. 7, no. 4, pp. 509-517, Dec 2007.

[22] Maeda, S., Choi, J. A., Yang, J. H., Jin, Y. S., Bae, S. K., Kim, Y. W., Suh, K. P., "Negative bias temperature instability in triple-gate transistors," in Proc. IEEE IRPS, 2004, pp. 8–12.

[23] Kim, S. Y., Lee, J. H., "Hot Carrier-Induced Degradation in Bulk FinFETs," IEEE Electron Device Lett., vol. 26, no. 8, pp. 566–568, Aug. 2005.

[24] Kufluoglu, H., Alam, M. A., "A geometrical unification of the theories of NBTI and HCI time-exponents and its implications for ultra scaled planar and surround-gate MOSFETs," in IEDM Tech. Dig., 2004, pp. 113–116.

[25] Ahn, Y. J., Cho, H. J., Kang, H. S., "Hot Carrier Generation and Reliability of BT(Body-tied)-Fin type SRAM cell Transistors (W_{fin}=20~70nm)," in Proc. IEEE IRPS, 2005, pp. 352-355.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[26] Newton, A. R., Sakurai, T. "Delay Analysis of Series-Connected MOSFET Circuits," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 26, no. 2, pp. 122-131, Feb. 1991.

[27] Sato, T., Takeishi, Y., Hara, H., Okamoto, Y., "Mobility Anisotropy of Electrons in Inversion Layers on Oxidized Silicon Surfaces," Phys. Rev. B, vol. 4, no. 6, pp. 1950-1960, 1971.

[28] Lu, H., "Compact Modeling of Double-Gate MOSFETs," PhD Dissertation, University of California, San Diego, 2006.

[29] Mishra, R., Ioannou, D. E., Mitra, S., "Effect of Floating-Body and Stress Bias on NBTI and HCI on 65-nm SOI pMOSFETs," IEEE Electron Device Lett., vol. 29, no. 3, pp. 262–264, Mar. 2008.

[30] He, J., Bian, W., Tao, Y., Liu, F., "An explicit current–voltage model for undoped double-gate MOSFETs based on accurate yet analytic approximation to the carrier concentration," Solid-State Electronics, no. 51, pp. 179–185, 2007.

[31] Peir´o, J., Sherwin, S., "Finite Difference, Finite Element and Finite Volume methods for partial differential quations," Handbook of Materials Modeling. vol. I: Methods and Models, Springer, pp. 1-32, 2005.

زیرنویس‌ها

[1] Trap
[2] Transconductance
[3] Linear Drain Current
[4] Saturation Drain Current
[5] Mobility
[6] Subthreshold Swing
[7] Threshold Voltage
[8] Negative Bias Temperature Instability
[9] Hot Carrier Injection
[10] Buried Channel
[11] Bulk
[12] Reaction-Diffusion
[13] Floating Body
[14] Donor-like Interface Trap
[15] Power Law
[16] Forward Reaction Rate
[17] Reverse Reaction Rate
[18] Capture Cross Section
[19] Activation Energy
[20] Fitting Parameter
[21] Root Mean Square Error
[22] Impact Ionization
[23] Substrate
[24] Mean Free Path
[25] Doping
[26] Poisson Equation
[27] Work Function
[28] Finite Difference Method
[29] Feedback

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]