

## محاسبه جریان تونل زنی اکسید گیت در MOSFET های کانال کوتاه

ایمان عباس پور کازرونی<sup>۱</sup>، سید ابراهیم حسینی<sup>۲</sup> و محسن خانی پرشکوه<sup>۳</sup>

دانشکده برق دانشگاه تربیت معلم سبزواری

<sup>۱</sup>Imanabaspur@gmail.com

<sup>۲</sup>Ehosseini@sttu.ac.ir

<sup>۳</sup>Mohsen.khaniparashkoh@gmail.com

چکیده - در این مقاله، مدلی برای جریان تونل زنی گیت در ماسفت های با اکسید گیت خیلی نازک ارائه شده است. در این مدل، با فرض عملکرد لایه وارونگی به شکل چاه پتانسیل و ساده سازی ها و محاسبه ضخامت این چاه، تابع موج الکترون ها در واسط میان نیمه هادی و اکسید را محاسبه می کنیم. مقدار تابع موج به دست آمده در محل اتصال نیمه هادی و اکسید، مقداری غیر صفر است که بر طبق جدیدترین نتایج، سازگاری بیشتری با کارهای تجربی دارد. سپس با استفاده از تابع موج حاصل، چگالی جریان تونل زنی الکترون ها محاسبه می شود. نتایج حاصل تطابق بالایی با مقالات ارائه شده در این زمینه دارد. کلید واژه- تابع موج، چاه پتانسیل، چگالی جریان تونل زنی.

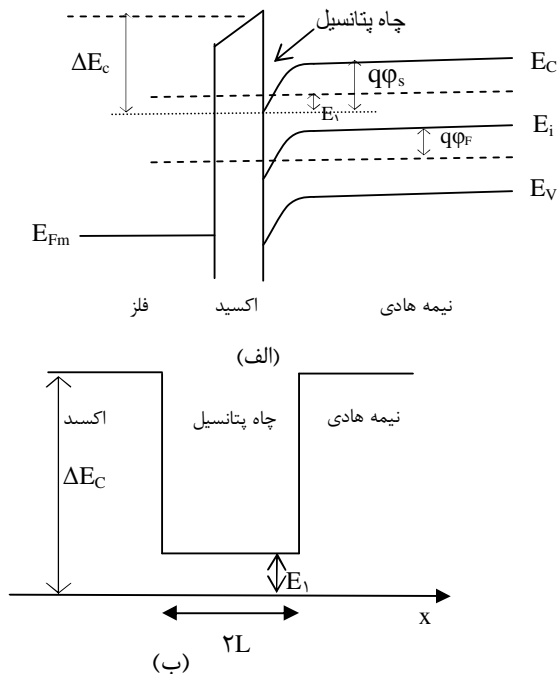
تواند در عملکرد ماسفت ها اثر قابل توجهی داشته باشد. در چند سال اخیر این پدیده بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

### ۱- مقدمه

در [۳] و [۴] یک رابطه ساده تحلیلی برای جریان تونل زنی مستقیم با در نظر گرفتن سد پتانسیل دوزنقه ای شکل به دست آمده است. در این مدل فیزیکی جریان گیت برای ولتاژ گیت صفر، به صفر نمی رسد و نتایج به دست آمده توسط این مدل برای ولتاژهای گیت زیر یک ولت با نتایج تجربی سازگار نیست. مدل نیمه تجربی ارائه شده توسط لی و هو [۵] بازه ی بیشتری از ولتاژ گیت اعمال شده را پوشش داده و تونل زنی حفره های باند ظرفیت را مورد تحلیل و بررسی قرار داده است. اما در آن از سطوح انرژی ناشی از حبس حامل ها در چاه پتانسیل چشم پوشی شده است. در مدل هایی که توسط لین و کو [۶]، و همچنین لیو، کانگ و هانگ [۷] ارائه شد نیز این اثر نادیده گرفته شده است.

در سال ۲۰۰۸ مندال و داتا [۸] مدلی ارائه کردند که در آن اثر حبس حامل ها در چاه پتانسیل مد نظر قرار گرفت. آنها در مدل پیشنهادی خود رابطه ای برای تابع موج ارائه کردند که در آن تابع موج به عرض چاه پتانسیل وابسته شده است. در نظر گرفتن حامل های محبوس در چاه پتانسیل باعث تغییر توزیع

در تکنولوژی های حال حاضر، ماسفت های با طول چند ده نانومتر ساخته می شود. به منظور افزایش هدایت انتقالی ترانزیستور و کاهش اثرات کانال کوتاه، ضخامت اکسید در ترانزیستورها کاهش می یابد [۱]. با افزایش چگالی ناخالصی، طول ناحیه تخلیه کم می شود، پس در ترانزیستور های با طول کم چگالی ناخالصی باید افزایش یابد. در این ماسفت ها متناسب با کاهش ضخامت اکسید، چگالی آرایش زیر پایه به طور یکنواخت افزایش می یابد. با افزایش آرایش زیر پایه و کاهش ضخامت اکسید، یک میدان الکتریکی قوی در حد واسط نیمه هادی و اکسید ایجاد می شود. این میدان الکتریکی قوی باعث ایجاد خمش باند بیشتر در نزدیکی واسط در داخل نیمه هادی می شود. حاصل این امر ایجاد یک چاه پتانسیل در محل تماس نیمه هادی با فلز است. انرژی حامل ها در این چاه کوانتیزه است [۲]. در چاه پتانسیل ایجاد شده در نیمه هادی بعضی از حامل ها می توانند در صورت دریافت انرژی کافی از اکسید عبور کرده و به گیت برسند و به این طریق پدیده ی تونل زنی رخ می دهد. جریان ایجاد شده توسط پدیده ی تونل زنی می



شکل (۱): الف: نمودار باند انرژی متعلق به یک NMOS ب: ساختار نهایی چاه پتانسیل پس از ساده سازی.

## ۲-۲- به دست آوردن تابع موج در مرز تماس

پس از ساده سازی به محاسبه ی عرض چاه پتانسیل که همان عرض ناحیه ی وارونگی است، می پردازیم. با فرض خطی بودن خمش باند در نیمه هادی در نزدیکی واسط، میدان الکتریکی در نیمه هادی در همه جا ثابت و برابر با میدان الکتریکی سطح  $E_s$  می باشد. بر این اساس و با حل معادله ی یک بعدی شرودینگر برای چاه پتانسیل مفروض رابطه ی سطح انرژی حالت پایه  $E_1$  به صورت زیر به دست می آید [۸]:

$$E_1 = 0.75 \left( \frac{\hbar^2}{2m_e} \right)^{1/3} \left[ \frac{9\pi}{8\epsilon_s} qQ_r \{1 + \ln \left[ \frac{qN'V_{GB}}{Q_r} \right]\} \right]^{2/3} \quad (1)$$

در رابطه ی (۱)،  $m_e$  جرم موثر الکترون ها در نیمه هادی،  $\hbar$  ثابت پلانک و  $\epsilon_s$  ضریب گذردهی نیمه هادی است.  $N'$  در این رابطه به صورت  $N' = [\epsilon_{ox}(V_{GB} - \phi_{ms} - \phi_s)] / (qt_{ox}) - N_{dep}$  تعریف می شود که  $\epsilon_{ox}$  ضریب گذردهی اکسید،  $t_{ox}$  ضخامت اکسید،  $\phi_{ms}$  اختلاف تابع کار فلز و نیمه هادی و  $N_{dep}$  چگالی یونهای تخلیه در واحد سطح است.  $Q_r$  چگالی بار سطحی و برابر است با:

$$Q_r = \sqrt{2q\epsilon_s N_A [\phi_s + \phi_t \exp(6)]}^{1/2} \quad (2)$$

حامل ها در نیمه هادی می شود مثلاً مقدار حداکثر چگالی حامل ها به جای اینکه در مرز تماس قرار گیرد در عمق قرار می گیرد، و برای محاسبه ی جریان تونل زنی گیت این اثر باید مورد توجه قرار گیرد.

در این مقاله، بر اساس روش ارایه شده [۸] مدلی ارایه می شود که بر اساس آن با استفاده از ساده سازی چاه پتانسیل و استفاده از روابط پایه، تابع موج الکترون در مرز تماس را محاسبه کرده و سپس چگالی جریان تونل زنی گیت را بر اساس احتمال تونل زنی به دست می آوریم. در بخش (۲) با حل معادله ی شرودینگر تابع موج الکترون به دست آمده و عرض چاه پتانسیل ناحیه ی وارونگی به دست آمده است. سپس در قسمت (۳) جریان گیت بر اساس تونل زنی الکترون محاسبه شده است. در بخش (۴) نتایج شبیه سازی روش پیشنهادی بررسی شده و در بخش (۵) جمع بندی معادله ذکر شده است.

## ۲- به دست آوردن تابع موج و عرض چاه پتانسیل

### ۲-۱- ساده سازی

ماسفت مورد بررسی ما در این مقاله از نوع NMOS است. در شکل (۱) نمودار باند انرژی مربوط به این ماسفت دیده می شود. خمش باند داخل نیمه هادی و در نزدیکی اکسید، شیب دار است که اگر این شیب را تقریباً خطی فرض کنیم، یک چاه پتانسیل مثلثی به وجود می آید. در مرحله ی بعد چاه پتانسیل مثلثی را با یک چاه پتانسیل مستطیلی معادل سازی می کنیم. این جایگزینی برای ساده سازی مدل و ارایه روابط تحلیلی ساده است. برای ساده سازی بیشتر چاه پتانسیل را به شکل یک چاه مستطیلی متقارن به ارتفاع  $\Delta E_c$  و عرض  $2L$  در نظر می گیریم. این تقریب از آن جهت قابل قبول است که مقدار عددی  $E_1$  نسبت به  $\Delta E_c$  و همچنین  $q\phi_s$  بسیار کمتر است.

خمش باند ناشی از وجود میدان در داخل اکسید نیز به دلیل کم بودن عرض ناحیه ی اکسید بسیار ناچیز و قابل صرف نظر است و می توان از آن چشم پوشی کرد. باید توجه داشت که تقریب های مذکور برای ساده سازی روابط در نظر گرفته می شوند و تغییری در نتایج ایجاد نمی کنند. با این فرض ها یک چاه پتانسیل مستطیلی متقارن به دست می آید. هدف این است که عرض چاه طوری انتخاب شود که جریان تونل زنی حاصل با مقدار اندازه گیری شده تطابق داشته باشد.

در روابط (۴) و (۶)، ضرایب  $\alpha$  و  $\gamma$  مقدار تابع موج در مرز تماس نیمه هادی و اکسید را تعیین می کنند. هرچه تابع موج در این نقطه بزرگتر باشد، جریان تونل زنی (جریان گیت) نیز بیشتر خواهد بود. با توجه به اینکه چاه پتانسیل مثلثی با یک چاه پتانسیل مستطیلی معادل جایگزین شده است، برای محاسبه ی دقیق جریان گیت انتخاب مقدار مناسب برای این پارامترها بسیار حیاتی است. با جایگذاری مقدار  $L$  در روابط (۴) و (۶) و انجام شبیه سازی های مختلف و مقایسه ی نتایج آن ها با نتایج مقالات ارایه شده [۵]، [۶]، [۷] و [۸] به یک مقدار تجربی مناسب برای ضرایب  $\alpha$  و  $\gamma$  رسیدیم که آن ها را تنها به اندازه ی عرض چاه پتانسیل وابسته می کند. ضریب اصلاح پیشنهادی  $\Gamma$  به صورت زیر بیان می شود:

$$\Gamma = \alpha = \gamma = 1.25 \sqrt{\frac{1}{2L}} \quad (10)$$

حال نتایج نهایی تابع موج الکترون در مرز تماس به صورت زیر نوشته می شوند:

$$\psi(x) = \begin{cases} 1.25 \sqrt{\frac{1}{2L}} \cos(Kx) & |x| < L \\ 1.25 \sqrt{\frac{1}{2L}} \exp(-Kx) & |x| > L \end{cases} \quad (11)$$

### ۳ - چگالی جریان تونل زنی گیت

پس از به دست آوردن تابع موج واسط به محاسبه ی چگالی جریان گیت با استفاده از احتمال تونل زنی می پردازیم. احتمال تونل زنی ( $P_T$ ) با استفاده از تقریب WKB، به صورت  $P_T = \exp(2 \int_0^{t_{ox}} K_{ox}(x) dx)$  بیان می شود که  $K_{ox}$  تعداد موج الکترون در اکسید است. پس از جایگذاری و ساده سازی، معادله ی زیر به دست می آید [۱۰]:

$$P_T = \exp \left( \frac{4}{3} \sqrt{\frac{2qm_{ox}Q_r(1 + \ln(qN'/Q_r))}{\hbar^2 \epsilon_s}} \left\{ \left( -t_{ox} + \frac{\Delta E_c - E_1}{(qQ_r/\epsilon_s)(1 + \ln(qN'/Q_r))} \right)^{3/2} - \left( \frac{\Delta E_c - E_1}{(qQ_r/\epsilon_s)(1 + \ln(qN'/Q_r))} \right)^{3/2} \right\} \right) \quad (12)$$

پتانسیل سطح  $\phi_s$  در شروع وارونگی قوی معادل  $\phi_F + \phi_T$  است که  $\phi_F$  پتانسیل عمق و برابر با  $\phi_i \ln(N_A/n_i)$  است [۸].  $N_A$  چگالی آرایش زیرپایه است.

پس از محاسبه ی انرژی حالت پایه به محاسبه ی عرض چاه پتانسیل مستطیلی متقارن می پردازیم. عرض چاه پتانسیل مستطیلی را مطابق شکل (۱) در نظر می گیریم. معادله ی شرودینگر مستقل از زمان برای یک بعد به صورت زیر است:

$$\left( -\frac{\hbar^2 d^2}{2m_e dx^2} + \Delta E_c \right) \psi(x) = E_1 \psi(x) \quad (3)$$

که در معادله ی (۳)،  $\psi(x)$  تابع موج است.

با حل معادله ی بالا برای چاه پتانسیل مفروض نتایج زیر به دست می آیند. برای  $|x| < L$  دو حالت تقارن زوج و فرد وجود دارد که معادلات (۴) و (۵) به ترتیب این دو حالت را بیان می کنند.

$$\psi(x) = \alpha \cos Kx \quad (4)$$

$$\psi(x) = \beta \sin Kx \quad (5)$$

در معادلات (۴) و (۵)  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایب معادله ی تابع موج هستند و  $K$  بردار موج با مقدار  $K = \sqrt{\frac{2m_e E_1}{\hbar^2}}$  است. برای  $|x| > L$ :

$$\psi(x) = \gamma \exp(-k|x|) \quad (6)$$

در معادله ی (۶)،  $\gamma$  ضریب معادله ی تابع موج و  $k$  بردار موج با مقدار  $k = \sqrt{\frac{2m_e(\Delta E_c - E_1)}{\hbar^2}}$  است.  $\Delta E_c$  و  $d^2\psi(x)/dx^2$  در تمام نقاط متناهی هستند و بنابراین  $\psi(x)$  و  $d\psi(x)/dx$  باید در تمام نقاط پیوسته باشند پس:

$$\alpha \cos KL = \gamma \exp(-kL) \quad (7)$$

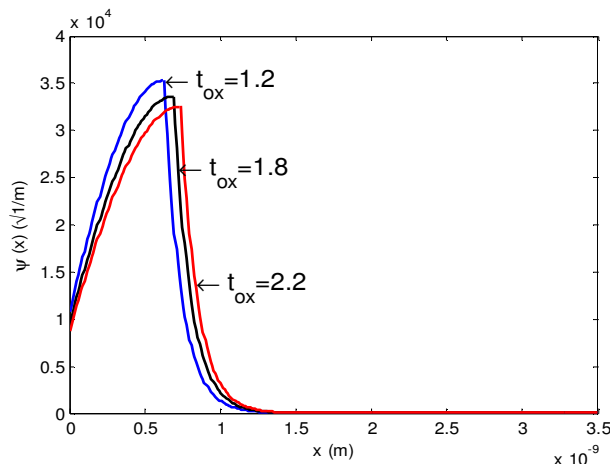
با مشتق گیری از رابطه ی (۷) به معادله ی زیر می رسیم:

$$-K\alpha \sin(KL) = -k\gamma \exp(-kL) \quad (8)$$

بنابراین:

$$K \tan(KL) = k \Rightarrow L = \frac{1}{K} \tan^{-1} \left( \frac{\Delta E_c - E_1}{E_1} \right) \quad (9)$$

در مدل Stern-Howard حبس حامل ها در چاه پتانسیل در نظر گرفته نشده است و همان طور که در شکل مشخص است مقدار تابع موج در مرز تماس طبق این مدل صفر است در حالی که در مدل پیشنهادی ما و همچنین در مدل ارائه شده توسط Mondal-Dutta [۸] این مقدار در مرز تماس، غیر صفر است. نکته ی قابل توجه دیگر این است که به دلیل حضور میدان الکتریکی قوی تقریباً تمام حامل های متحرک در نزدیکی واسط قرار می گیرند تا یک لایه ی وارونگی خیلی نازک تشکیل دهند. به همین دلیل، شکل تابع موج باید با افزایش  $x$  (پیشروی در عمق) با شیبی تند به سمت صفر میل کند. اما همان طور که در شکل (۲) مشهود است در مدل Stern-Howard این شیب بسیار کم و در مدل Mondal-Dutta کم است و این بدین معناست که کسر قابل توجهی از بارهای لایه ی معکوس در نزدیکی واسط محبوس نشده اند و در هنگام وقوع وارونگی قوی، در عمق توزیع شده اند که مغایر با تصویر فیزیکی صحیح از توزیع حامل هاست. در صورتی که در مدل پیشنهادی ارائه شده در این مقاله سرعت صفر شدن تابع موج با افزایش  $x$  بسیار بیشتر از دو مدل دیگر است که مطابقت بیشتری با اصل فیزیکی توزیع حامل ها دارد. در شکل (۳) نمودار تابع موج برای سه ضخامت اکسید مختلف رسم شده است.



شکل (۳): نمودار تابع موج برای NMOS با  $N_A = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  و  $V_{GB} = 0.62 \text{ V}$  با ضخامت اکسیدهای متفاوت  $t_{ox} = 1/8$  ،  $t_{ox} = 1/2 \text{ nm}$  و  $t_{ox} = 2/2 \text{ nm}$

در این معادله  $m_{ox}$  جرم موثر الکترون در اکسید است. برای یافتن چگالی حامل متحرک در لایه ی وارونگی از معادله ی تعادل بار استفاده می کنیم:

$$Q = \left( \frac{\epsilon_{ox} (V_{GB} - \phi_{ms} - \phi_s)}{t_{ox}} \right) \quad (13)$$

$Q$  چگالی بار کل در نیمه هادی است. حال می توان چگالی جریان تونل زنی را به صورت زیر تعریف کرد [۸]:

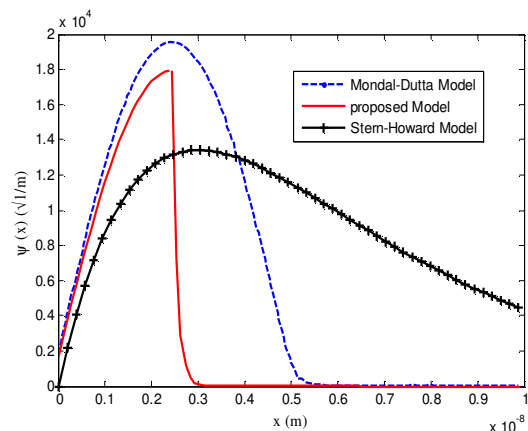
$$J_n = \left| \left( Q - \sqrt{2q\epsilon_s N_A \phi_s} \right) \psi(0) \right|^2 P_T \sqrt{\frac{2E_1}{m_m}} \quad (14)$$

$m_m$  جرم موثر الکترون در فلز است. مقدار  $\sqrt{\frac{2E_1}{m_m}}$  به

عنوان سرعت الکترون ها در مرز تماس اکسید-فلز تعریف می شود. با استفاده از تابع موج الکترون به دست آمده در نقطه ی صفر چگالی جریان تونل زنی گیت به دست می آید. باید توجه داشت که این مقدار به عواملی مانند ولتاژ گیت و ضخامت اکسید وابسته است.

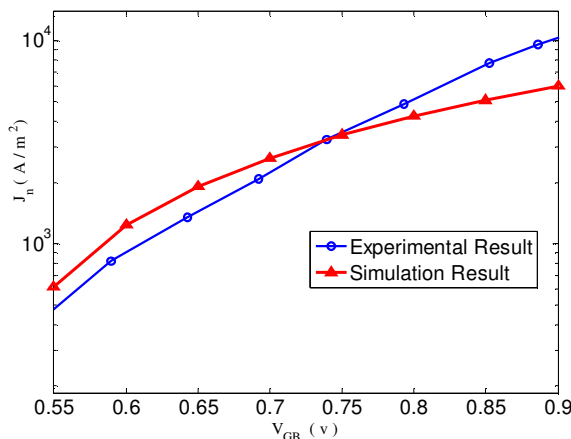
#### ۴- نتایج شبیه سازی

در شکل (۲) تابع موج حاصل برای یک NMOS با  $V_{GB} = 0.62 \text{ V}$  و  $t_{ox} = 2/3 \text{ nm}$  ،  $N_A = 4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  مربوط به روش پیشنهادی، مدل Stern-Howard [۹] و مدل Mondal-Dutta رسم شده است. مقدار عددی برای ناپیوستگی باند هدایت  $\Delta E_c$  در واسط برای Si-SiO<sub>2</sub> معادل  $3/2 \text{ eV}$  و مقدار پتانسیل سطح  $1 \text{ V}$  در نظر گرفته شده است.



شکل (۲): نمودار تابع موج برای NMOS با  $N_A = 4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  ،  $t_{ox} = 2/3 \text{ nm}$  و  $V_{GB} = 0.62 \text{ V}$ . در اینجا نتایج مدل پیشنهادی به همراه نتایج مدل Stern-Howard و Mondal-Dutta آورده شده است. مقدار تابع موج در نقطه ی صفر در مدل پیشنهادی برابر با  $1790 \text{ m}^{-1/2}$  است.

همراه با نتایج شبیه سازی با استفاده از مدل ارائه شده در این مقاله آورده شده است. در این شکل دیده می شود که تطابق خوبی بین نتایج شبیه سازی و مقدار عملی وجود دارد. میزان درصد خطای کم و تطابق بالا با نتایج تجربی و واقعیت های فیزیکی نسبت به مدل های ذکر شده از مزایای روش پیشنهادی است.



شکل (۵): نمودار نتایج آزمایشگاهی چگالی جریان تونل زنی گیت بر حسب ولتاژ گیت بدنه برای یک NMOS با  $t_{ox}=1/56 \text{ nm}$  و  $N_A=10^{18} \text{ cm}^{-3}$  برگرفته از [۸] به همراه نتایج حاصل از مدل پیشنهادی.

### ۵- نتیجه گیری

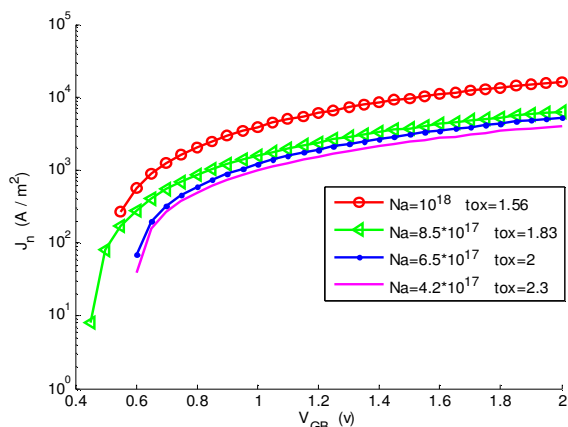
در این مقاله با استفاده از حل معادله ی شرودینگر مدلی برای به دست آوردن تابع موج الکترون ها در واسط میان نیمه هادی و اکسید ارائه شد و بر اساس آن و با کمک رابطه ی احتمال تونل زنی، محاسبه ی چگالی جریان تونل زنی گیت انجام شد. مقدار تابع موج به دست آمده در محل اتصال نیمه هادی و اکسید، مقداری غیر صفر است که بر طبق جدیدترین نتایج، سازگاری بیشتری با کارهای تجربی دارد. نتایج و شبیه سازی های به دست آمده از این مدل تطابق خوبی با نتایج تجربی حاصل از مقالات ارائه شده در این زمینه دارد به طوری که خطا برای چگالی آلیش ها و ضخامت اکسیدهای مختلف و در محدوده ی ولتاژ زیر ۲ ولت- که در اکثر مقالات معتبر بررسی می شود- به طور متوسط کمتر از ۱۰٪ است.

### مراجع

- [۱] Bogdan Majkusiak, "Gate Tunnel Current in an MOS Transistors" *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. ۳۷, no. ۴, APRIL ۱۹۹۰.
- [۲] S. M. Sze, Kwok K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley & Sons, INC. pp. ۲۹۳-۳۷۴, ۲۰۰۷.

همان طور که در شکل (۳) مشخص است با افزایش ضخامت اکسید مقدار حداکثر تابع موج و نیز مقدار آن در سطح تماس کاهش می یابد.

در شکل (۴) نتایج شبیه سازی چگالی جریان تونل زنی گیت با استفاده از تابع موج پیشنهادی به دست آمده برای  $t_{ox}=1/56 \text{ nm}$  با  $N_A=10^{18} \text{ cm}^{-3}$  و  $t_{ox}=1/83 \text{ nm}$  با  $N_A=6/5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  ،  $N_A=8/5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  و  $t_{ox}=2/3 \text{ nm}$  با  $N_A=4/2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  رسم شده است. همان طور که در شکل مشخص است با افزایش ضخامت اکسید در ماسفت چگالی جریان تونل زنی گیت کاهش می یابد. با افزایش ولتاژ گیت-بدنه ( $V_{GB}$ )، عرض چاه پتانسیل (۲L) کاهش می یابد و این عامل باعث می شود که با افزایش  $V_{GB}$ ، چگالی جریان تونل زنی ( $J_n$ ) افزایش یابد.



شکل (۴): نمودار چگالی جریان تونل زنی گیت بر حسب ولتاژ گیت بدنه برای ضخامت اکسید های مختلف ( $t_{ox}=1/56 \text{ nm}$ ) با  $N_A=10^{18} \text{ cm}^{-3}$  ،  $N_A=6/5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  با  $t_{ox}=2 \text{ nm}$  ،  $N_A=8/5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  و  $t_{ox}=2/3 \text{ nm}$  با  $N_A=4/2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

نتایج شبیه سازی چگالی جریان تونل زنی گیت از مدل پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی [۸] تطابق بالایی دارد. به عنوان نمونه میزان خطا در  $t_{ox}=1/56 \text{ nm}$  در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در [۸] به طور متوسط در حدود ۸ درصد است. لازم به ذکر است که در ولتاژ های گیت بالا میزان درصد خطا افزایش می یابد که این عامل در تمامی مدل های ارائه شده دیگر نیز کاملاً مشهود است و به دلیل پایین بودن ضخامت اکسید گیت، تحلیل چگالی جریان تونل زنی گیت در تمامی مقالات در ولتاژ های گیت پایین انجام می شود. در شکل (۵) نمودار مربوط به نتایج آزمایشگاهی چگالی جریان تونل زنی مربوط به یک NMOS با  $t_{ox}=1/56 \text{ nm}$  و  $N_A=10^{18} \text{ cm}^{-3}$

- [۳] K. F. Schuegraf, C. C. King, and C. Hu, "Ultra-thin silicon dioxide leakage current and scaling limit," in *Dig. Symp. VLSI*, pp. ۱۸-۱۹, ۱۹۹۲.
- [۴] K. F. Schuegraf and C. Hu, "Hole Injection SiO Breakdown model for very low voltage lifetime extrapolation," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ۴۱, no. ۹, pp. ۷۶۱-۷۶۷, ۱۹۹۴.
- [۵] W. C. Lee and C. Hu, "Modeling CMOS tunneling currents through ultrathin gate oxide due to conduction- and valence-band electron and hole tunneling," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. ۴۸, no. ۷, pp. ۱۳۶۶-۱۳۷۳, Jul. ۲۰۰۱.
- [۶] C.H. Lin, J.B. Kuo, "Closed-form partitioned gate tunneling current model for NMOS devices with an ultra-thin gate oxide" *Solid-State Electronics*, vol ۵۳, pp. ۱۱۹۱-۱۱۹۷, ۲۰۰۹.
- [۷] Xiaoyan Liu, Jinfeng Kang, Ruqi Han, "Direct tunneling current model for MOS devices with ultra-thin gate oxide including quantization effect and polysilicon depletion effect" *Solid State Communications*, vol ۱۲۰, pp. ۲۱۹-۲۲۳, ۲۰۰۳.
- [۸] Imon Mondal and Alope K. Dutta, "An Analytical Gate Tunneling Current Model for MOSFETs Having Ultrathin Gate Oxides", *IEEE Trans. on Electron Devices*, Vol ۵۵, no. ۷, JULY ۲۰۰۸.
- [۹] F. Stern, "Self-consistent results for n-type Si inversion layers," *Phys. Rev.B, Condens. Matter*, vol. ۹, no. ۱۲, pp. ۴۸۹۱-۴۸۹۹, Jun. ۱۹۷۲.
- [۱۰] A. Ghatak and S. Lokanathan, *Quantum Mechanics: Theory and Application*, ۵th ed. New York, McMillan, pp. ۳۸۰-۳۹۷ and ۷۲۱-۷۲۴, ۲۰۰۴.