

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1399.6.2.1.7

درصد همانندی: ۰٪

## تأثیر فشار هیدرواستاتیک بر مینیم نویز ترانزیستورهای AIGaN/GaN با تحرک بالای الکترونی

رجب یحیی زاده<sup>۱\*</sup>، زهرا هاشم پور<sup>۲</sup>

rajab.yahyazadeh@iaukhoy.ac.ir

zahra.hashempour@iaukhoy.ac.ir

<sup>۱\*</sup> نویسنده مسئول، استادیار، گروه فیزیک، واحد خوی، دانشگاه آزاد اسلامی، خوی

<sup>۲</sup> استادیار، گروه فیزیک، واحد خوی، دانشگاه آزاد اسلامی، خوی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۱

### چکیده

در این مقاله، مدل عددی برای محاسبه چگالی و جریان الکترونی چاه کوانتم ترانزیستورهای AIGaN/GaN با در نظر گرفتن فشار هیدرواستاتیکی ارائه شده است که امکان بررسی اثر فشار روی رسانندگی متقابل، زیر باندهای چاه کوانتمی، جریان‌های نشت سطحی و حجمی و در نهایت مینیم نویز را فراهم می‌کند. در این مدل از حل خودسازگار معادله شرودینگر و پواسون در به دست آوردن چگالی گاز الکترونی دوبعدی استفاده شده که در آن تا پنج زیر باند انرژی در نظر گرفته شده است. افزایش فشار معادل گیت مجازی در ترانزیستورها در مجاورت گیت حقیقی عمل می‌کند که باعث افزایش عمق چاه کوانتم، جریان و چگالی الکترونی، رسانندگی متقابل، جریان‌های نشت و در نهایت مینیم نویز می‌شود. با افزایش فشار زیر باندها چاه کوانتم دوبعدی به سمت پایین فشرده می‌شود و الکترون‌ها بستگی قوی پیدا می‌کنند و محدودیت کوانتمی افزایش می‌یابد. همچنین در هر فرکانس و جریان درین سورس دلخواهی افزایش فشار باعث افزایش مینیم نویز می‌شود. نتایج محاسبه شده با داده‌های تجربی موجود مطابقت خوبی دارند.

**واژه‌های کلیدی:** فشار هیدرواستاتیکی، مینیم نویز، نشت گیت، چاه کوانتم

### ۱. مقدمه

مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۱-۳]. از کاربردهای صنعتی ترانزیستورهای نیتريدی استفاده در سنسورهای فشاری با نام سوئیچ فشار (قطع یا وصل مدار الکتریکی) است که اغلب به صورت مبدل کار می‌کنند و جریان و سیگنالی تابع اثر فشار

در سال‌های اخیر، ترانزیستورهای با تحرک پذیری بالایی الکترونی AIGaN/GaN به خاطر مشخصه‌های توان بالا در محدوده فرکانس‌های میکروویو و میلی‌ویو به طور گسترده‌ای

جریان‌های نشت سطحی و حجمی و در نهایت مینیم نویز را بررسی کرد. مهم‌ترین مزایای این روش عددی و جنبه نوآوری در این کار، استفاده از پنج پارامتر مهم جرم مؤثر، گاف انرژی، ثابت‌های شبکه، ثابت دی الکتریک و ضخامت سد و چاه کوانتم است که هم‌زمان به فشار و دما وابسته می‌باشند. همچنین در این کار اثر خود گرمایی<sup>۳</sup> که عامل اصلی رسانندگی منفی در ناحیه اشباع جریان الکترونی است، در نظر گرفته شده است. در این مدل محاسباتی از حل خودسازگار معادله شرودینگر و پواسون چگالی گاز الکترونی دوبعدی ( $n_{2D}$ ) به دست آمده است که در آن تا ۵ زیر بانده انرژی در نظر گرفته شده است. همچنین در تمامی محاسبات، فشار اتمسفر به همراه فشار هیدرواستاتیک منظور شده است ( $P = P_{hydro} + P_{atm}$ ). یعنی در فشار هیدرواستاتیک صفر، تنها فشار اتمسفر اعمال می‌شود. بخش دوم مربوط به مدل عددی-تحلیلی با روابط تحلیلی وابسته به فشار و دما، همچنین جریان‌های نشت گیت و مینیم نویز است و بخش سوم نتایج و بحث‌های حاصله از طریق محاسبه و رسم شکل‌ها است. در این بخش نتایج برخی محاسبات با نتایج تجربی موجود از سایر مقاله‌ها مقایسه شده است. در این مدل بخشی از گیت به صورت صفحه‌ای در بالای گیت در نظر گرفته شده که فقط برای ایجاد میدان الکتریکی عرضی در سد کوانتم که در نهایت به افزایش قطبش و چگالی جریان کل الکترونی در چاه منجر می‌شود.

## ۲. مدل عددی-تحلیلی

### ۲-۱. حل خودسازگار معادله شرودینگر و پواسون

مدل شماتیکی ترانزیستورهای اثر میدان AlGaIn/GaN طبق شکل ۱ است. چاه کوانتومی دوبعدی در جهت محور X و جهت رشد (AlGaIn روی لایه زمینه GaN) در طول محور Z است.  $L_{SG}$ ،  $L_G$  و  $L_{GT}$  به ترتیب طول سورس-گیت، طول گیت و طول گیت-درین است. در این مدل برای محاسبه دقیق مقادیر انرژی فرمی، انرژی ترازهای کوانتیزه در داخل چاه کوانتم دوبعدی، توابع موج و تراکم الکترونی داخل هر زیر بانده در ساختار نامتجانس AlGaIn/GaN هر دو معادله شرودینگر و پواسون می‌بایست به صورت خود سازگار

تولید می‌کند. همچنین به طور غیرمستقیم برای اندازه‌گیری دبی سیال، سرعت، سطح مایع و ارتفاع استفاده می‌شوند. ضرورت توجه به بهبود کیفیت ترانزیستورهای با محدوده عملکرد بالا (توان بالا و فرکانس قطع بالا) تحت اثر فشار الکتریکی موجب شد عواملی که باعث افزایش جریان الکتریکی و نویز این ترانزیستورها در محدوده عملکرد بالا می‌شوند، مورد بحث و بررسی قرار گیرند، از جمله عوامل افزایش نویز، افزایش جریان نشت گیت<sup>۱</sup> می‌باشد که تابع فشار هیدرواستاتیک است [۴]. با توجه به اینکه سنسورهای فشاری که از این ترانزیستورها (هر سیستم مخابراتی دیگر) ساخته شده‌اند، هنگام انتقال سیگنال با فرستنده یا دریافت سیگنال در گیرنده، مقداری سیگنال ناخواسته (نویز) به سیستم وارد می‌شود که برای گیرنده نامطلوب است و باعث کاهش کیفیت مخابره اطلاعات می‌شود از این رو، بررسی تأثیر فشار بر ترانزیستورهای که تحرک الکترونی بالایی دارند؛ حائز اهمیت است. اخیراً، تأثیر تنش خارجی به صورت فشار بر چگالی و جریان الکترونی چاه کوانتم این ترانزیستورها به طور تحلیلی انجام شده است [۵]. همچنین جریان نشت گیت و مینیم نویز مبتنی بر ترانزیستورهای نیتزیدی توسط چندین گروه بررسی و محاسبه شده است که در این کارها در محاسبه جریان نشت گیت ساختارهای نیتزیدی بدون تفکیک به سطحی، حجمی و برپایه مدل مدارهای الکترونیکی انجام شده است [۶-۸]. با توجه به اینکه جریان نشت گیت مهم‌ترین پارامتر برای مینیم نویز است؛ مستلزم بررسی دقیق تمامی جریان‌های نشت اعم از سطحی و حجمی است. برای بررسی دقیق وابستگی به فشار این نوع ترانزیستورها ابتدا باید وابستگی پارامترهای فیزیکی در معادله‌های فشار بررسی شود. که این معادله‌ها شامل معادله شرودینگر، پواسون، جریان الکتریکی، جریان نشت گیت و مینیم نویز است. در تحقیق حاضر، یک مدل عددی برای محاسبه چگالی و جریان چاه کوانتم ترانزیستورهای AlGaIn/GaN ارائه شده است. که در آن اثر فشار هیدرواستاتیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. از طریق این جریان و چگالی می‌توان وابستگی به فشار هیدرواستاتیک رسانندگی متقابل<sup>۲</sup>، میدان الکتریکی در سد AlGaIn،

که  $V$  توزیع پتانسیل و  $\rho$  چگالی بارهای خالص و در نهایت  $P_{tot}$  چگالی بارهای قطبشی کل است. چگالی با قطبشی کل از مجموع قطبش‌های پیزوالکتریک<sup>۵</sup> و خودبه‌خودی<sup>۶</sup> تشکیل شده است. سه پارامتر دیگر وابسته به فشار در این مدل در نظر گرفته شده است که به صورت زیر هستند [۱۴، ۱۵].

(الف) قطبش خودبه‌خودی  $P^{SP}$  و پیزوالکتریک  $P^{PZ}$  مربوط به چاه (GaN) و سد کوانتم (AlGaIn) که وابستگی به فشار آن‌ها به صورت روابط تحلیلی زیر هستند.

$$P_{GaIn}^{PZ} = -0.918\epsilon + 9.541\epsilon^2 \quad (۵)$$

$$P_{AlN}^{Pz} = \begin{cases} -1.808\epsilon + 5.624\epsilon^2 & \text{for } \epsilon < 0 \\ -1.808\epsilon - 7.888\epsilon^2 & \text{for } \epsilon > 0 \end{cases}$$

$$P_{AlGaIn}^{SP} = 0.090m - 0.034(1-m) + 0.21x(1-m)$$

در این روابط  $\epsilon$  کشش است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\epsilon(T, P, m) = \frac{a_c - a_e(T, P, m)}{a_e(T, P, m)} \quad (۶)$$

$a_e(T, P, m)$  و  $a_c$  به ترتیب ثابت شبکه بدون فشار و تحت فشارند و به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۶ و ۱۷].

$$a_e(T, P, m) = a_0(m) \left[ \left( 1 + \beta(T - T_e) \right) \left( 1 - \frac{P}{3B_0} \right) \right] \quad (۷)$$

که  $B_0$  مدول حجمی و  $\beta_{GaIn}$  ضریب وابساط گرمایی است که مقادیر عددی آن‌ها در جدول ۱ داده شده‌اند. همچنین  $a_0(m)$ ، ثابت شبکه وابسته به ناخالصی آلومینیم است [۱۸].

$$a_0(m) = 0.13989m + 0.03862 \quad (۸)$$

در نهایت قطبش کل وابسته به فشار و دما در محل اتصال AlGaIn/GaN به صورت زیر حاصل می‌شود [۱۹].

$$\sigma_s(T, P, m) = \left| P_{Al_mGa_{1-m}N}^{PZ} + P_{Al_mGa_{1-m}N}^{SP} - P_{GaIn}^{SP} - P_{GaIn}^{PZ} \right| \quad (۹)$$

(ب) دو پارامتر دیگری که وابسته به فشار هیدرواستاتیکی در نظر گرفتیم ثابت‌های دی الکتریکی سد، چاه و طول‌های آن‌ها هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند [۲۰، ۲۱].

حل شوند، که این کار با حل معادله شرودینگر و هم‌زمان با در نظر گرفتن پتانسیل الکترواستاتیک از معادله پواسون صورت گرفته است (ضمیمه ۱). در معادله پواسون پتانسیل‌های تصویری و همبستگی نیز منظور شده است. با توجه به بالا بودن گاف انرژی ساختارهای GaIn نسبت به InN و AlN این امکان را به ما می‌دهد، که هامیلتونی سیستم را ساده کنیم یعنی هامیلتونی  $8 \times 8$  را به دو هامیلتونی  $1 \times 1$  (برای نوارهای رسانش  $\Gamma_{7c}$ ) و یک هامیلتونی  $6 \times 6$  (برای یک نوار ظرفیت  $\Gamma_{9v}$  و دو نوار ظرفیت  $\Gamma_{7v}$ ) تفکیک کنیم. در یک بعد ما می‌توانیم هامیلتونی  $6 \times 6$  را به دو هامیلتونی  $3 \times 3$  تفکیک کنیم [۹، ۱۰]. بنابراین معادله شرودینگر  $1 \times 1$  به صورت زیر است.

$$-\frac{\hbar^2}{2m_e^*} \nabla^2 \psi_n + V \psi_n = E_n \psi_n \quad (۱)$$

که در آن  $\hbar$  ثابت پلانک،  $\psi_n$  توابع موج الکترونی و  $E_n$  انرژی زیر باندهای الکترونی و در نهایت  $m_e^*$  جرم مؤثر الکترونی که به صورت زیر است [۱۱، ۱۲].

$$\frac{m_0}{m_e^*(P, T, m)} = 1 + \frac{E_p^\Gamma(E_g^\Gamma(P, T, m) + 2\Delta_{s0}/3)}{E_g^\Gamma(E_g^\Gamma(P, T, m) + \Delta_{s0})} \quad (۲)$$

در این رابطه  $m_0$  جرم الکترون آزاد،  $E_p^\Gamma$  انرژی مرتبط با عنصر ماتریس اندازه حرکت،  $\Delta_{s0}$  شکافتگی اسپین-مدار و  $E_g^\Gamma(P, T, m)$  گاف انرژی است، که مقادیر عددی این دو پارامتر در جدول ۱ داده شده است. در مدل عددی ارائه شده گاف انرژی یکی از پارامترهایی است که به فشار هیدرو استاتیکی و دما وابسته است و به صورت زیر است [۱۳].

$$E_g(T, P) = E_g(0, 0) + \gamma P + \sigma P^2 - \frac{\alpha T^2}{T + T_e} \quad (۳)$$

در این معادله  $\gamma$ ،  $\sigma$ ،  $\alpha$  و  $T_e$  مقادیر ثابت‌اند که مقادیر عددی آن‌ها در جدول ۱ داده شده‌اند. لازم به بیان است در معادله پواسون یک جمله مربوط به بارهای قطبشی است که مهم‌ترین تأثیر فشار هیدرو استاتیکی روی این بارهای قطبشی است که به صورت زیر توضیح داده می‌شود.

$$\kappa \nabla^2 V = -\rho + \nabla P_{tot} \quad (۴)$$

$$\frac{\Delta T}{T_{sub}} = \frac{(1 - (P_{diss} / 4P_0)^4)}{(1 - P_{diss} / 4P_0)^4} \quad (17)$$

که در آن  $P_{diss} = I_{DS} V_{DS}$  پاشندگی توان و  $P_0$  داری بعد توان می باشد که طبق رابطه زیر است.

$$P_0 = \frac{\pi K_{GaN} (T_{sub}) W T_{sub}}{\ln(8d_{sub} / \pi L_G)} \quad (18)$$

در این رابطه  $d_{sub}$  ضخامت لایه زمینه و

$$K_{SiC} (T_{sub}) = 3.4 (T_{sub} / 300)^{-1.5}$$

رسانندگی گرمایی است. جزئیات محاسبه در فلوچارت ۱ نشان داده شده است. در این مدل دمای زمینه  $T_{sub} = 300 + \lambda P_{diss}$  وابسته به  $\lambda$  است که پارامتر متناظر با مقاومت گرمایی است که با رسانندگی متقابل قابل محاسبه و مقدار آن در این نمونه  $\lambda = 5K / W$  است [۲۳].

## ۲-۲. جریان نشت گیت و مینیمم نویز

با مشخص شدن جریان الکترونی در چاه کوانتم ( $I_{DS}$ )، رسانندگی متقابل ( $g_m = \partial I_{DS} / \partial V_{DS}$ ) را می توان محاسبه و در نهایت مینیمم نویز با رابطه زیر قابل محاسبه است [۶].

$$NF_{min} = 1 + 2(1 + g_m) \frac{S_{I_g}}{g_m 4KT} + 2(k_g \omega) \sqrt{1 + \frac{\omega_g^2}{\omega^2} + 2(k_g \omega)^2} \quad (19)$$

در این رابطه  $S_{I_g} = 2qI_{GLC}$  است که در آن  $I_{GLC}$  جریان کل نشت گیت است. این جریان مربوط به جریان الکترون های گیت به تله های سطحی (بین گیت و درین  $I_{surf}$ ) است. این تله های سطحی کم عمق بوده و قسمتی از نویز، مربوط به این تله هاست که رابطه تحلیلی این جریان از مرجع ۲۴ استفاده شده است، برای بررسی دقیق تر موقعیت این تله ها، جریان سطحی در شکل ۳ نشان داده شده است. سهم دیگری در نویز مربوط به تولید جریان در چاه کوانتم به وسیله گیت است ( $I_{2DT}$ ) که عمده این جریان مربوط به تله های حجمی سد کوانتمی است ( $I_{TAT}$ ) [۲۴ و ۲۶]. در حالت کلی جریان نشت گیت برابر رابطه زیر است [۲۴].

$$\varepsilon^{GaN}(T, P) = 10.28 \times \exp \times (10^{-4} (T - T_0) - 6.7 \times 10^{-3} P) \quad (10)$$

$$\varepsilon^{AlGaN}(m, T, P) = \varepsilon^{GaN}(T, P) + 0.03m \quad (11)$$

$$d_{Al_m Ga_{1-m} N}(T, P) = d_{AlGaN}(0) \times [1 - (S_{11}^{Al_m Ga_{1-m} N} + 2S_{12}^{Al_m Ga_{1-m} N}) P] \quad (12)$$

$$d_{GaN}(T, P) = d_{GaN}(0) \times [1 - (S_{11}^{GaN} + 2S_{12}^{GaN}) P] \quad (13)$$

که  $d_{AlGaN}(0)$  و  $d_{GaN}(0)$  طول های سد و چاه کوانتم بدون اعمال فشار و دمای خارجی است. ثابت های  $S_{11}$  و  $S_{12}$  طبق روابط زیر محاسبه می شوند [۱۲، ۲۱].

$$S_{11} = \frac{C_{11} C_{33} - C_{13}^2}{(C_{11} - C_{12}) [C_{33} (C_{11} + C_{12}) - 2C_{13}^2]} \quad (14)$$

$$S_{12} = \frac{C_{12} C_{33} - C_{13}^2}{(C_{11} - C_{12}) [C_{33} (C_{11} + C_{12}) - 2C_{13}^2]} \quad (15)$$

$C$  ثابت های کشسانی هستند که مقادیر عددی آن از مرجع ۱۲ استفاده شده است. با وارد کردن این پارامترهای وابسته به فشار و حل معادله شرودینگر چگالی الکترونی را محاسبه کرده، سپس جریان الکترونی ( $I_{DS}$ ) در چاه کوانتم در نواحی اشباع<sup>۸</sup> و خطی که الگوریتم محاسباتی آن طبق فلوچارت شکل ۲ است، از روابط زیر به دست می آوریم [۲۲].

$$I_{DS} = \begin{cases} Wqv_{n_{2D}}(T, P) - qD \frac{dn_{2D}(T, P)}{dx} & \text{خطی} \\ Wqv_{sat} n_{2D}(T, P) - qD \frac{dn_{2D}(T, P)}{dx} & \text{اشباع} \end{cases} \quad (16)$$

در این معادله  $W$  پهنای گیت،  $v_{sat}$  سرعت سوق الکترون و  $D(T)$  ثابت پخش الکترونی است که به تحرک الکترونی ( $\mu$ ) از رابطه  $D = k_B T \mu / q$  وابسته است. با توجه به تأثیر مهم خود گرمایی الکترونی در جریان چاه کوانتمی این اثر به صورت روابط زیر و طبق الگوریتم محاسباتی (که در فلوچارت شکل ۲ نشان داده شده) منظور شده است. لایه زمینه در این کار سیلیکون کاربید (SiC) و دمای آن  $T_{sub}$  است، اختلاف دمای بین کانال چاه کوانتم ( $T_{ch}$ ) و دمای لایه زمینه ( $\Delta T = T_{ch} - T_{sub}$ ) از رابطه ۱۷ محاسبه می شود [۳۲].

$(E_{Fi})$  می‌شود، که در شکل ضمیمه افزایش عمق چاه نشان داده شده است. به ازای افزایش فشار 30 GPa عمق چاه کوانتم به اندازه  $62 \text{ meV}$  افزایش می‌یابد که نقش مهمی در محدودیت کوانتمی و افزایش تراکم الکترونی زیر باندهای چاه کوانتم دوبردی خواهد داشت. همچنین موقعیت جریان های نشت گیت  $(I_{surf}, I_{2DT})$  حاصل از تله‌های سطحی و حجمی مشخص شده است که جریان نشت حجمی در حجم نمونه و درسد کوانتم ALGaIn، و در مجاورت چاه کوانتم GaIn است، ولی جریان نشت سطحی بین سطح گیت درین است. شکل ۵ وابستگی ناپیوستگی باند رسانش  $(\Delta E_C)$ ، گاف‌های انرژی AlGaIn  $(E_g^{AlGaIn})$  و GaN  $(E_g^{GaN})$  به فشار هیدرواستاتیک را نشان می‌دهد. با افزایش فشار، گاف‌ها و ناپیوستگی انرژی افزایش می‌یابند. در این شکل به ازای افزایش 30 GPa ناپیوستگی نواری به اندازه  $0.53 \text{ eV}$  افزایش می‌یابد که عامل اصلی افزایش عمق چاه کوانتمی است، شکل ۴ این افزایش را تأیید می‌کند. این پدیده مربوط به اصلاح فواصل بین اتمی شبکه کریستالی با فشار هیدرواستاتیک است. شکل ضمیمه ۵ تغییرات چگالی بار قطبشی سطحی  $(\sigma_s)$  بر حسب فشار هیدرواستاتیک را نشان می‌دهد. با افزایش فشار، به دلیل افزایش قطبش پیزو الکتریک و خودبه‌خودی، چگالی بار قطبشی سطحی افزایش می‌یابد که به ازای افزایش فشار 30 GPa چگالی بار قطبشی سطحی به اندازه  $48 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-2}$  افزایش می‌یابد. بنابراین همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، قطبش کل AlGaIn (پیزوالکتریک و خودبه‌خودی) و چگالی بار قطبشی سطحی با فشار هیدرواستاتیک افزایش می‌یابد که در نهایت با افزایش فشار هیدرواستاتیک، ثابت شبکه‌ای  $(a_e)$  AlGaIn و GaIn تغییر می‌یابند. شکل ۷ نوار انرژی چاه کوانتم (با زیر باندهای انرژی تا زیر باند پنجم) بر حسب فاصله در فشارهای مختلف و در دمای  $T_e = 300 \text{ K}$  برای ساختار  $Al_{0.3}Ga_{0.7}N / GaN$  است. طبق این شکل با افزایش فشار، زیر باندها به سمت پایین فشرده می‌شوند، با افزایش فشار به میزان  $30 \text{ GPa}$  تغییرات انرژی زیر باند اول که بیشترین نقش در محاسبات را دارد (طبق توضیحات شکل ۸) برابر

$$I_{GLC} = I_{surf} + I_{2DT} \quad (20)$$

همچنین در این رابطه  $\omega = 2\pi f$  فرکانس زاویه‌ای است.  $\omega_g$  و  $k_g$  به صورت روابط زیر هستند.

$$k_g = 1 + g_m R_s C_{gs} \sqrt{S_{Id} R_{in} / (g_m^2 4kT)} \quad (21)$$

$$\omega_g = \frac{g_m}{C_{gs}} \sqrt{S_{Ig} / (R_{in} g_m^2 4kT)} \quad (22)$$

$$S_{Id} = 4kT \frac{I_{DS}}{V_{DS}} + S_{Ig} \quad (23)$$

به ترتیب شدت طیف جریان نویز مربوط به جریان‌های درین و گیت است. با توجه به رابطه ۱۹ حتی اگر جریان نشت گیت نباشد، جریان درین وجود دارد و مینیمم نویز مربوط به جریان چاه کوانتمی خواهد بود. در این روابط،  $R_g = 1.7 \Omega$  مقاومت فلزی گیت،  $R_s = 1.8 \Omega$  مقاومت اتصال چشمه و  $R_i = (L_G / v_{sat} C_{gs})$  است که در این رابطه  $v_{sat}$  سرعت اشباع الکترونی چاه کوانتم بوده و برابر  $2.63 \times 10^5 \text{ m/s}$  است [۶]. ظرفیت الکترونی گیت-سورس است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۷].

$$C_{gs} = \sum_{k=0}^3 q W L_G \frac{\partial n_k}{\partial V_{GS}} \quad (24)$$

اندیس ۱ تا ۳ به ترتیب بیانگر چگالی الکترون‌های چاه کوانتم، الکترون‌های آزاد و یون‌های دهنده خنثی شده سد کوانتم AlGaIn هستند.

### ۳. نتایج و بحث

در این مقاله یک مدل عددی-تحلیلی ارائه می‌دهیم که در آن با اعمال فشار هیدرواستاتیکی خارجی بتوان مینیمم نویز را محاسبه کرد. در حل خودسازگار معادله شرودینگر و پواسون از روش تکرار استفاده شده که فاصله گام‌ها در محاسبات در راستای Z برابر  $1 \times 10^{-10} \text{ m}$  است. در محاسبات عددی هنگامی که اختلاف انرژی فرمی بین تکرارهای متوالی  $(E_{F(n)} - E_{F(n-1)})$  کمتر از  $10^{-4} \text{ eV}$  باشد، همگرایی صورت می‌گیرد که توضیحات کامل در ضمیمه ۱ است. شکل ۴ نمودار نوار رسانش ترانزیستور  $Al_{0.3}Ga_{0.7}N / GaN$  است. با توجه به شکل، افزایش فشار باعث افزایش عمق چاه و افزایش تراز نسبی انرژی فرمی

افزایش می‌یابد. سومین پارامتری که برای محاسبه مینیمم نویز لازم است جریان نشت کل الکترونی است. با توجه به اینکه بخشی از جریان الکترونی چاه سهمی از جریان نشت حجمی (مربوط به تونل زنی الکترونی به تله‌های حجمی AlGaIn) دارد که با محاسبه و اضافه کردن نشت حجمی روی نشت سطحی، جریان نشت کل طبق شکل ۱۱ است. با افزایش ولتاژ گیت تله‌های بیشتری در حجم و سطح اشغال می‌شوند که اشغال این تله‌ها بر حسب انرژی آن‌ها، وابسته به ولتاژ گیت است. پر شدن تله‌های سطحی باعث کاهش بارهای مثبت سطحی بین گیت و درین شده و این ناحیه شبیه یک ولتاژ خارجی و به موازی گیت عمل می‌کند که به گیت مجازی معروف است به عبارتی جریان نشت سطحی تولید گیت را مجازی می‌کند، در نتیجه هر چه ولتاژ بیشتر باشد، تله‌های بیشتری (به ترتیب انرژی از کم به زیاد) اشغال شده و جریان نشت افزایش می‌یابد که در شکل ۱۱ این فرایند به صورت افزایشی دیده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶ بررسی شد؛ افزایش فشار چگالی بارهای الکترونیکی مثبت سطحی را افزایش می‌دهد و عاملی برای تونل زنی الکترون‌های گیت به ناحیه سطحی می‌شود که در جهت افزایش نشت عمل می‌کند و شبیه گیت مجازی مثبت عمل می‌باشد و چگالی الکترون‌های حجمی را افزایش می‌دهد (طبق ضمیمه شکل ۷) که باعث افزایش نشت حجمی می‌شود. با توجه به شکل ۱۱ به ازای افزایش 30 GPa جریان نشت گیت در  $V_{DS} = 10V$  به اندازه  $5\mu A$  افزایش می‌یابد. در نتیجه فشار خارجی باعث افزایش جریان نشت می‌شوند. بعد از محاسبه تمامی پارامترهای وابسته به فشار، وابستگی مینیمم نویز به فشار را می‌توان محاسبه و رسم کرد که طبق شکل ۱۲ است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت افزایش فشار هیدرواستاتیکی باعث افزایش مینیمم نویز می‌شود که علت آن مربوط به سهم اضافی در چگالی بارهای قطبشی حاصل از فشار است که در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به اینکه مینیمم نویز به پارامترهای مختلفی مانند فرکانس و جریان درین - سورس وابسته است، برای بررسی بهتر، مینیمم نویز را بر حسب این پارامترها و در فشارهای مختلف محاسبه و در شکل‌های ۱۳

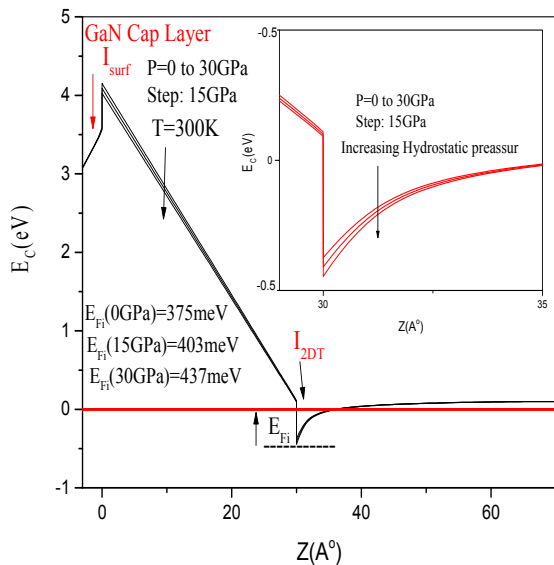
$meV$  ۲۳ و به سمت پایین چاه است. این تغییر انرژی به سمت پایین، انرژی بستگی الکترون‌ها را افزایش داده (در شکل ۴ اشاره شد) و محدودیت کوانتمی افزایش می‌یابد. هر چه عمق چاه بیشتر باشد؛ محدودیت بیشتر و چگالی الکترونی در چاه افزایش می‌یابد که این افزایش چگالی الکترون‌های چاه در شکل ضمیمه نشان داده شده است. به ازای تغییرات فشار 30 GPa چگالی الکترونی به مقدار  $1.7 \times 10^{18} cm^{-3}$  افزایش می‌یابد. با محاسبه سهم تمامی ۵ زیر باندها در چگالی الکترونی در فشار 30 GPa (طبق شکل ۸)، مشاهده می‌شود، بیشترین سهم در چگالی مربوط به زیر باند اول است و فقط پیک اول زیر باند دوم در شکل ضمیمه سهم کمی دارد؛ بنابراین بیشترین تأثیر فشار هیدرو استاتیکی روی زیر باند اول و چگالی الکترونی مربوط به آن است. بعد از محاسبه وابستگی چگالی الکترونی، جریان و رسانندگی الکترونی چاه کوانتمی که دو پارامتر مهم برای محاسبه مینیمم نویز است را می‌توان محاسبه و رسم کرد که به صورت شکل‌های ۹ و ۱۰ است. شکل ۹ جریان درین سورس بر حسب ولتاژ درین سورس در فشارهای مختلف برای ساختار  $Al_{0.24}Ga_{0.76}N / GaN$  است. در این شکل بیشترین تأثیر فشار در ناحیه اشباع است که به ازای افزایش فشار 30GPa تغییرات جریان درین سورس در ولتاژ گیت ۱ ولت و در ولتاژ درین ۱۴ ولت به میزان  $5mA$  است. جریان درین سورس در ناحیه اشباع نزولی بوده و علت آن مربوط به اثر خود گرمایی است. با منظور کردن این اثر در محاسبات عددی، جریان درین سورس تطابق خوبی با داده‌های تجربی دارد. با مشخص شدن جریان الکترونی چاه کوانتم رسانندگی متقابل را می‌توان محاسبه کرد. شکل ۹ رسانندگی متقابل بر حسب جریان درین سورس در فشارهای مختلف برای ساختار  $Al_{0.15}Ga_{0.75}N / GaN$  است. با توجه به این شکل با افزایش فشار رسانندگی متقابل افزایش می‌یابد که به ازای افزایش فشار 30 GPa رسانندگی متقابل در  $I_{DS} = 200mA / mm$  به اندازه  $20 mS / mm$  افزایش می‌یابد. با مقایسه شکل‌های ۹ و ۱۰ می‌توان نتیجه گرفت با افزایش فشار، جریان درین سورس و رسانندگی متقابل



سطوح مختلف، تله‌ها (سطحی و حجمی)، دو مسیر جریان‌های نشت گیت  
سطحی گیت درین و حجمی داخل چاه کوانتم است [۲۴].

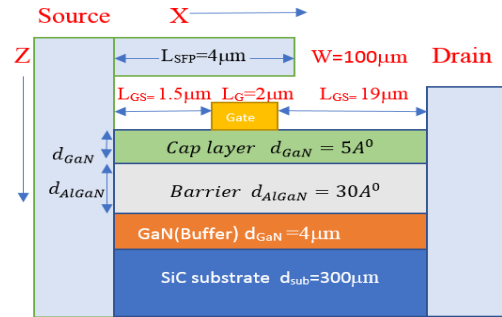
جدول ۱. مقادیر پارامترهای مربوط به GaN و AlN

پارامترها (واحد)	GaN	AlN	مرجع
$E_p^r (eV)$	۱۴	۱۴/۵	[۱۲]
$E_g^r(0K, 0GPa)(eV)$	۳/۴۲	۶/۱۳	[۱۴]
$\Delta_{s0} (eV)$	۰/۰۱۴	۰/۰۱۹	[۱۲]
$\gamma (meV.GPa^{-1})$	۳۱/۸	۴۰/۵	[۳۱]
$\delta (meV.GPa^{-2})$	۰/۰۲۳	۰/۰۱۹	[۳۱]
$C_{11} (GPa)$	۳۷۰	۴۱۰	[۱۵]
$C_{12} (GPa)$	۱۴۵	۱۴۰	[۱۵]
$C_{13} (GPa)$	۱۱۰	۱۰۰	[۱۵]
$C_{33} (GPa)$	۳۹۰	۳۹۰	[۱۵]
$\alpha (eV.K^{-1}) \times 10^{-3}$	۰/۹۰۹	۱/۷۹۹	[۱۲]
$T_e (K)$	۸۳۰	۱۴۶۲	[۱۲]
$\beta (K^{-1}) \times 10^{-6}$	۵/۵۶	۴/۲۰	[۱۶]
$B_0 (GPa)$	۲۱۰	۲۰۴	[۳۰]

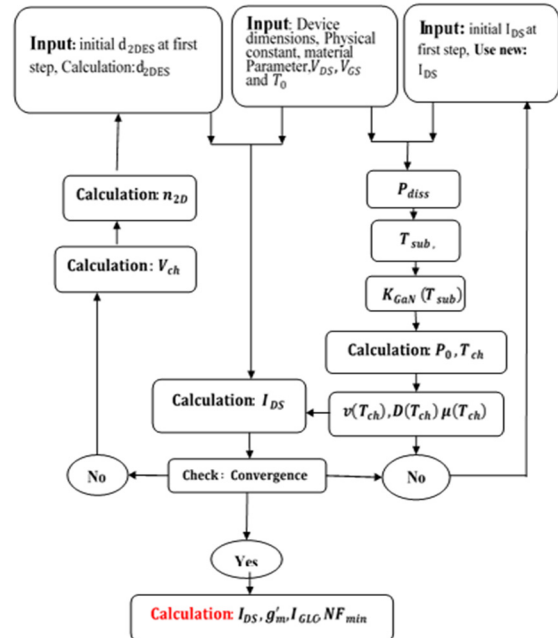


شکل ۴. برای ساختار  $Al_{0.3}Ga_{0.7}N / GaN$  است. شکل ضمیمه تغییرات چاه کوانتم بر حسب فشار با گام 15GPa است. در این شکل پارامترهای هندسی از شکل یک و پارامترهای فیزیکی مورد نیاز برای حل خودسازگار از جدول یک استفاده شده است.

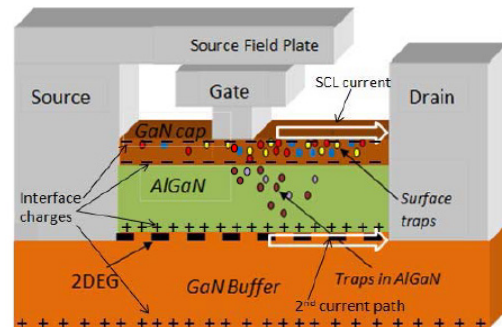
الف و ب نشان داده شده است. در جمع‌بندی کلی در هر فرکانس و جریان درین سورس دلخواهی افزایش فشار باعث افزایش مینیمم نویز می‌شود که این روند افزایشی به صورت سه‌بعدی در این شکل‌ها نشان داده شده است.



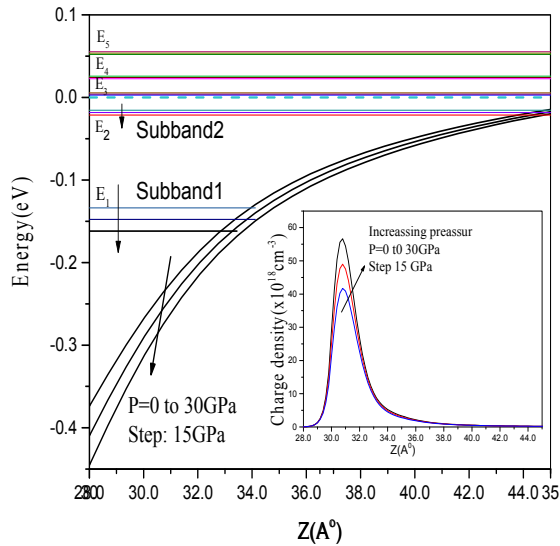
شکل ۱. شکل شماتیکی ترانزیستور اثر میدان AlGaIn/GaN



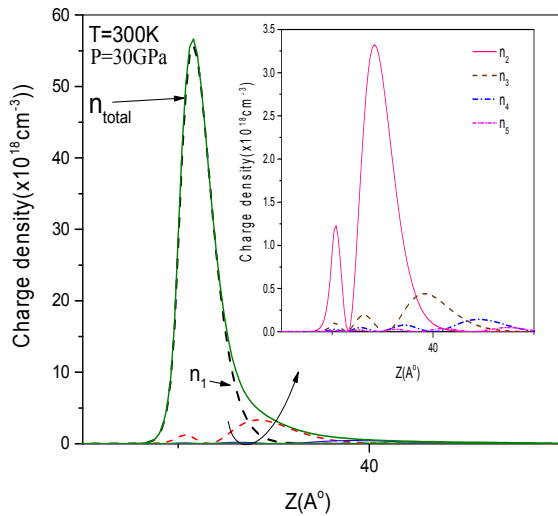
شکل ۲. فلوچارت مربوط به الگوریتم محاسباتی مینیمم نویز ترانزیستور اثر میدان AlGaIn/GaN



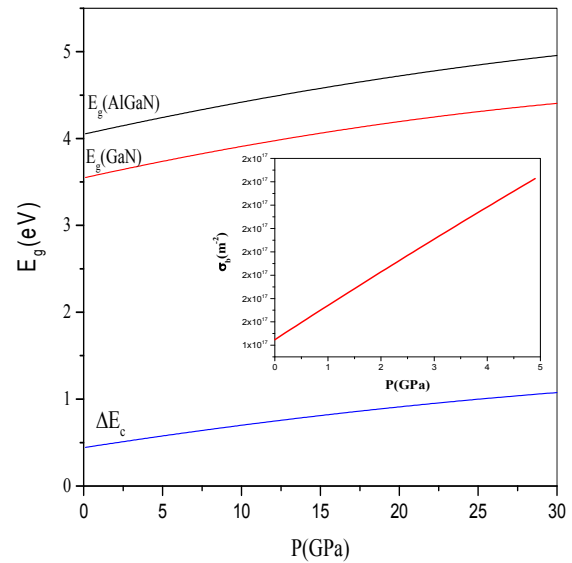
شکل ۳. شکل ساختار ترانزیستور AlGaIn/GaN به همراه بارهای قطبشی در



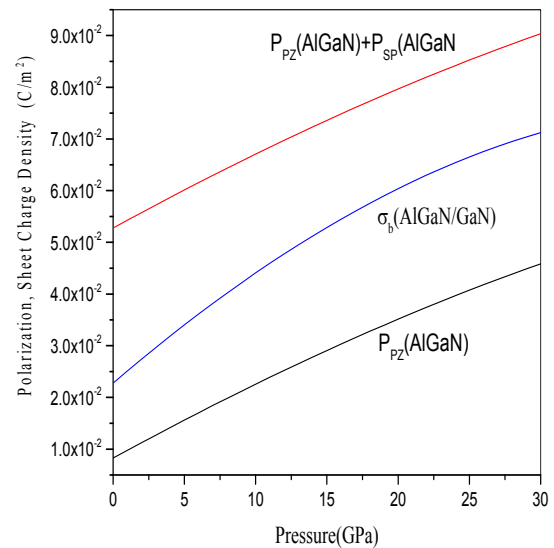
شکل ۷. شکل نوار انرژی چاه کوانتم (به هم زیر باندهای انرژی تا زیر باند پنجم) بر حسب فاصله در فشارهای مختلف و در دمای  $T_e = 300K$  برای ساختار  $Al_{0.3}Ga_{0.7}N / GaN$  است. شکل ضمیمه چگالی الکترونی در فشارهای مختلف است. در این شکل برای پارامترهای هندسی از شکل یک و پارامترهای فیزیکی مورد نیاز از جدول یک استفاده شده است.



شکل ۸. چگالی الکترونی کل ( $n_{total}$ ) با چگالی در تمامی زیر باندهای آن در فشار  $30GPa$  بر حسب فاصله و در دمای  $T_e = 300K$  برای ساختار  $Al_{0.3}Ga_{0.7}N / GaN$  است. شکل ضمیمه سهم سایر زیر باندها (به جز  $n_1$ ) را نشان می‌دهد. در این شکل برای پارامترهای هندسی از شکل یک و پارامترهای فیزیکی مورد نیاز از جدول یک استفاده شده است.

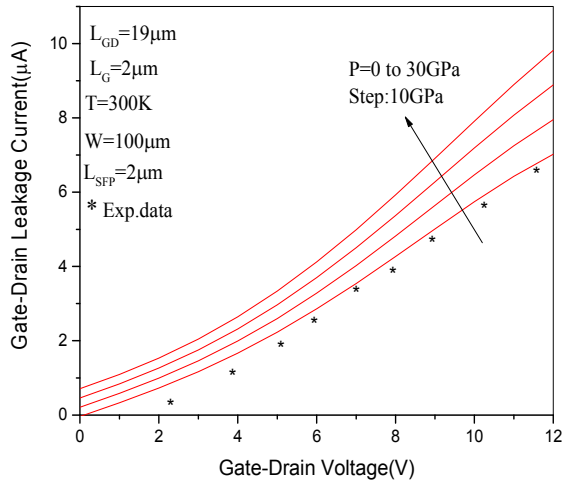


شکل ۵. وابستگی باند رسانش، گاف‌های انرژی AlGaIn و GaN به فشار هیدرواستاتیک در دمای  $T_e = 300K$ . شکل ضمیمه نشانگر وابستگی چگالی بار قطبشی سطحی به فشار است.

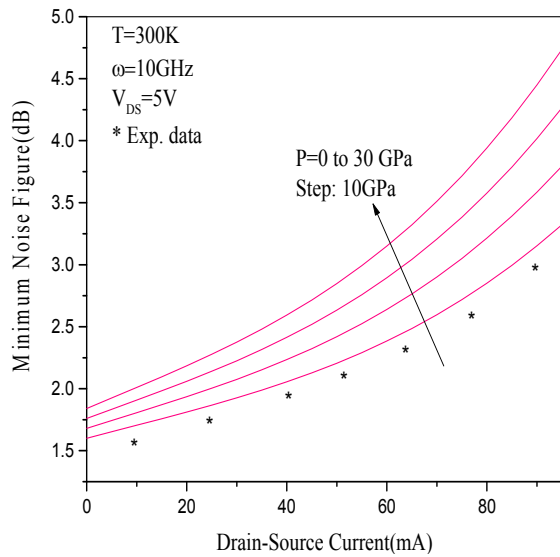


شکل ۶. تغییرات قطبش‌های پیزوالکتریک و خودبه‌خودی و چگالی بار سطحی کل ( $\sigma_p$ ) بر حسب فشار هیدرواستاتیک در دمای  $T_e = 300K$  برای ساختار در این شکل برای پارامترهای هندسی از شکل یک و پارامترهای فیزیکی مورد نیاز از جدول یک استفاده شده است.

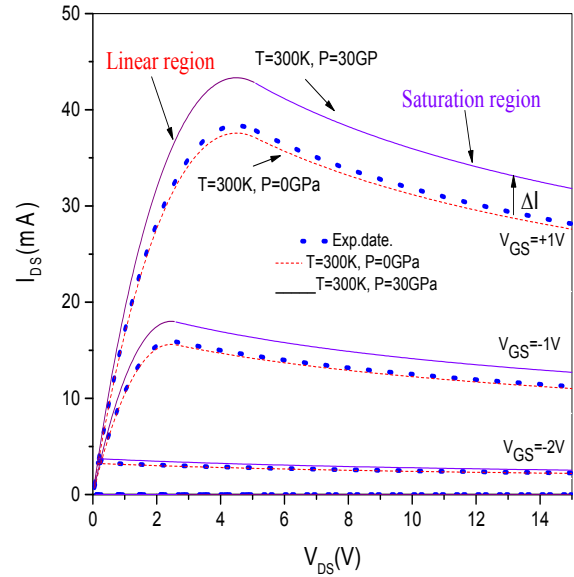




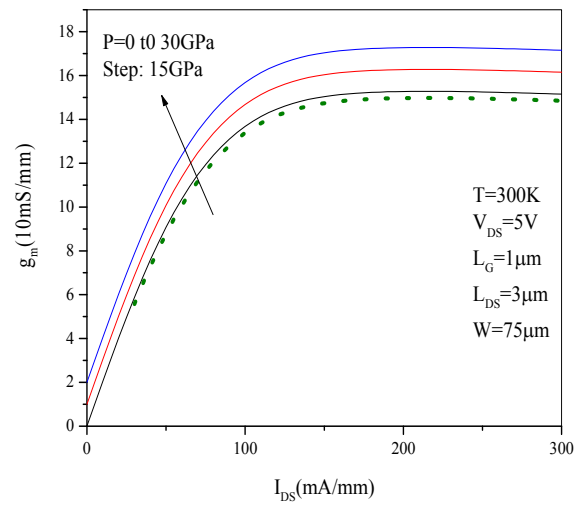
شکل ۱۱. جریان نشت کل گیت درین بر حسب ولتاژ گیت درین سورس در فشارهای مختلف در دمای  $T_e = 300K$  برای ساختار  $Al_{0.23}Ga_{0.76}N / GaN$  است. در این شکل برای پارامترهای هندسی و داده‌های تجربی از مرجع [۲۴] و پارامترهای فیزیکی موردنیاز از جدول یک استفاده شده است.



شکل ۱۲. مینیم نویز بر حسب جریان درین- سورس در فشارهای مختلف در دمای  $T_e = 300K$  برای ساختار  $Al_{0.27}Ga_{0.73}N / GaN$  است. در این شکل برای پارامترهای هندسی و داده‌های تجربی از مرجع ۴ و پارامترهای فیزیکی موردنیاز از جدول یک استفاده شده است.



شکل ۹. جریان درین بر حسب ولتاژ درین در فشارهای مختلف در دمای  $T_e = 300K$  برای ساختار  $Al_{0.24}Ga_{0.76}N / GaN$  است. در این شکل پارامترهای هندسی و داده‌های تجربی از مرجع ۲۸ و پارامترهای فیزیکی موردنیاز از جدول یک استفاده شده است.



شکل ۱۰. رسانندگی متقابل بر حسب جریان درین سورس در فشارهای مختلف در دمای  $T_e = 300K$  برای ساختار  $Al_{0.15}Ga_{0.15}N / GaN$  است. در این شکل برای پارامترهای هندسی و داده‌های تجربی از مرجع ۲۹ و پارامترهای فیزیکی موردنیاز از جدول یک استفاده شده است.

#### ۴. نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل عددی- تحلیلی برای محاسبه جریان الکترونی چاه کوانتم ارائه شد که در آن با وارد کردن فشار هیدرواستاتیکی، مینیم نویز محاسبه شد. با افزایش فشار زیر باندهای چاه کوانتم دوبعدی به سمت پایین فشرده می شوند و الکترون ها دارای بستگی قوی شده و محدودیت کوانتمی افزایش می یابد. افزایش فشار معادل گیت مجازی در ترانزیستورها در مجاورت گیت حقیقی عمل می کند که باعث افزایش چگالی بارهای قطبشی، عمق چاه کوانتم، جریان و چگالی الکترونی، رسانندگی متقابل، جریان های نشت و در نهایت مینیم نویز می شود. در هر فرکانس و جریان درین سورس دلخواهی افزایش فشار باعث افزایش مینیم نویز می شود.

#### ۵. پیوست

در این مدل عددی گسسته سازی معادله های شرودینگر و پواسون با استفاده از روش تفاضل متناهی انجام شده است که در آن از طرح مرتبه دوم حل عددی معادله های دیفرانسیل استفاده می شود. بنابراین در این روش یک جمله پیوسته مانند

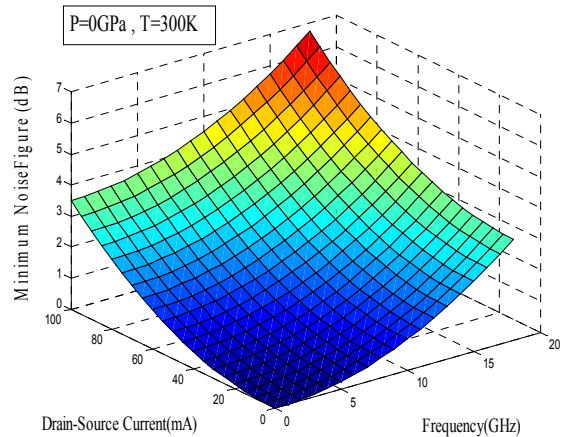
به صورت زیر گسسته می شود.

$$\frac{d}{dz} \left( f \frac{d\psi}{dz} \right) = \frac{(f_{i+1} + f_i) \times (\psi_{i+1} - \psi_i)}{2 \Delta z} \quad (پ ۱)$$

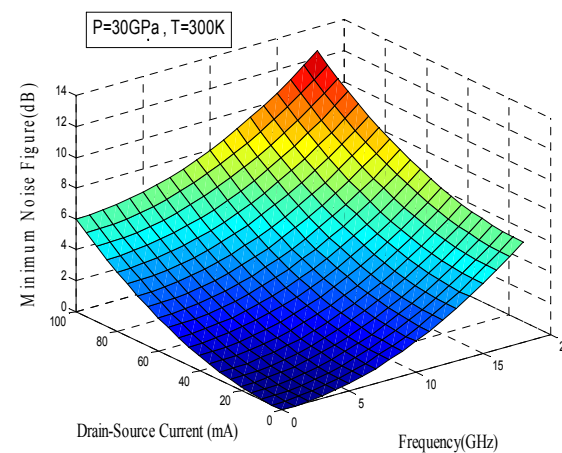
معادله شرودینگر به صورت  $H\psi_i = E\psi_i$  است که در آن عناصر غیر صفر ماتریس هامیلتونی به صورت زیر است.

$$H(i, j) = \begin{cases} \frac{\hbar^2}{2m_0\Delta z^2} \frac{1}{2} \left( \frac{1}{m^*(i)} + \frac{1}{m^*(i-1)} \right) & \text{if } j = i + 1 \\ \frac{\hbar^2}{2m_0\Delta z^2} \left( \frac{1}{2} \left( \frac{1}{m^*(i)} + \frac{1}{m^*(i-1)} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{m^*(i)} + \frac{1}{m^*(i+1)} \right) \right) + E_c(i) & j = i \\ -\frac{\hbar^2}{2m_0\Delta z^2} \frac{1}{2} \left( \frac{1}{m^*(i)} + \frac{1}{m^*(i+1)} \right) & j = i - 1 \end{cases} \quad (پ ۲)$$

که اختلاف بین دو انرژی فرمی کمتر از  $10^{-4} eV$  باشد، ادامه خواهد داشت. شرط مرزی معادله شرودینگر برابر رابطه زیر است.



الف



ب

شکل ۱۳. مینیم نویز بر حسب جریان درین سورس و فرکانس برای ساختار  $Al_{0.3}Ga_{0.7}N / GaN$  است، شکل الف برای حالت  $P = 0GPa$  و شکل ب برای حالت  $P = 30GPa$  است. در این شکل برای پارامترهای هندسی از مرجع ۲۴ و پارامترهای فیزیکی مورد نیاز از جدول یک استفاده شده است.

با این روش سیستم ماتریس مربوط به معادله پواسون آسان است. در این روش ویژه مقادیر ویژه حالت های الکترون های چاه کوانتم با روش تکرار طبق فلوچارت شکل ۲ به دست می آیند. در روش تکرار همگرایی محاسبات عددی زمانی

- [4] Sanabria C, Chakraborty A, Xu H, Rodwell MJ, Mishra UK, York RA. The effect of gate leakage on the noise figure of AlGaIn/GaN HEMTs. IEEE electron device letters. 2005 Dec 19;27(1):19-21.
- [5] Gongwei Hu, Ligie I, Yan Z. Tow dimensional electron gas in piezotronic devices. Nano Energy. 2019; 59: 667-673.
- [6] Bhattacharya M. et al. Influence of gate leakage current induced shot noise on the Minimum Noise Figure of InAlAs/InGaAs double-gate HEMT. Superlattice and Microwave. 2017; 6036(16): 31613-5.
- [7] Azam F, Tanneeru A, Lee B, Misra V. Engineering a unified dielectric solution for AlGaIn/GaN MOS-HFET gate and access regions. IEEE Transactions on Electron Devices. 2020 Feb 21;67(3):881-7.
- [8] Kim HS, Kang MJ, Kim JJ, Seo KS, Cha HY. Effects of Recessed-Gate Structure on AlGaIn/GaN-on-SiC MIS-HEMTs with Thin AlOxNy MIS Gate. Materials. 2020 Jan;13(7):1538.
- [9] Jogai B. Free electron distribution in AlGaIn/GaN heterojunction field-effect transistors. Journal of applied physics. 2002 Mar 15;91(6):3721-9.
- [10] Yahyazadeh R. Numerical Modeling of Electronic and Electrical Characteristics of InGaIn/GaN Multiple Quantum Well Solar Cells. Journal of Photonics for Energy. 2020; 10(4): 045504.
- [11] Yahyazadeh R, Hashempour Z. Numerical Modeling of the Electronic and Electrical Characteristics of AlGaIn/GaN Multiple Quantum Well Solar Cells. Journal of Optoelectronic Nanostructures. 2020; 5(3): 81-102.
- [12] Vurgaftman I, Meyer JÁ, Ram-Mohan LÁ. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys. Journal of applied physics. 2001 Jun 1;89(11):5815-75.
- [13] Christensen NE, Gorczyca I. Optical and structural properties of III-V nitrides under pressure. Physical Review B. 1994 Aug 15;50(7):4397.
- [14] Ambacher O, Foutz A. B, Smart J et al. Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization in undoped and doped AlGaIn/GaN heterostructures. Journal of Applied Physics. 2000; 87: 334.
- [15] Ambacher O, Majewski J, Miskys C, et al. Pyroelectric properties of Al (In) GaIn/GaN hetero- and quantum well structures. J. Phys. Condens. Matter: 2002; 14: 3399.

$$\psi_n(z=0) = \psi_n(z=L) = 0 \quad (3پ)$$

در این جا L ارتفاع کل ساختار در راستای z است. شرط مرزی مربوط به معادله پواسون به صورت زیر است.

$$\left. \frac{d(V_H + V_P)}{dz} \right|_{z=0} = \left. \frac{d(V_H + V_P)}{dz} \right|_{z=L} = 0 \quad (4پ)$$

جزئیات حل خود سازگار معادله شرودینگر به صورت زیر است:

(الف) در نظر گرفتن یک مقدار اختیاری برای  $n_{2D}$

(ب) حل معادله پواسون،

(ج) حل معادله شرودینگر و به دست آوردن ویژه مقادیر و

ویژه توابع انرژی چاه کوانتم،

(د) با استفاده از معادله‌های زیر چگالی الکترونی و انرژی

فرمی  $(E_F)$  را به دست می‌آوریم:

$$n_{2D}(z) = \sum_{i=1}^5 \frac{m^* K_B T}{\pi \hbar^2} \ln \left[ 1 + \exp\left(\frac{E_F - E_i}{K_B T}\right) \right] \psi_i^2(z) \quad (5پ)$$

$$E_F = E_0 + \frac{\pi \hbar^2}{m^*} n_{2D} \quad (6پ)$$

$$E_0 = \left\{ \frac{9\pi \hbar^2 e^2}{8\epsilon_0 \sqrt{8m^*} \epsilon_{GaIn}} \frac{n_{2D}}{\epsilon_{GaIn}} \right\} \quad (7پ)$$

اگر  $E_{F(n)} - E_{F(n-1)} < 10^{-4} eV$  باشد برنامه خاتمه یابد در

غیر این صورت  $(E_{F(n)} - E_{F(n-1)} > 10^{-4} eV)$  چگالی

الکترونی جدید را در معادله پواسون قرار داده و مراحل بالا

را تا زمانی ادامه دهد که شرط همگرایی

$$E_{F(n)} - E_{F(n-1)} < 10^{-4} eV \text{ برقرار شود.}$$

## مراجع

- [1] Latorre-Rey AD, Sabatti FF, Albrecht JD, Saraniti M. Hot electron generation under large-signal radio frequency operation of GaN high-electron-mobility transistors. Applied Physics Letters. 2017 Jul 3;111(1):013506.
- [2] Ma J, Matioli E. Slanted tri-gates for high-voltage GaN power devices. IEEE Electron Device Letters. 2017 Jul 25;38(9):1305-8.
- [3] Tang G, Kwan AM, Wong RK, Lei J, Su RY, Yao FW, et al. Digital integrated circuits on an E-mode GaN power HEMT platform. IEEE Electron Device Letters. 2017 Jul 11;38(9):1282-5.

- [26] Turuvekere S, Karumuri N, Rahman AA, Bhattacharya A, DasGupta A, DasGupta N. Gate leakage mechanisms in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> and AlIn<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs: comparison and modeling. *IEEE Transactions on electron devices*. 2013 Jul 24;60(10):3157-65.
- [27] Mojaver HR, Valizadeh P. Reverse gate-current of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HFETs: Evidence of leakage at mesa sidewalls. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2016 Feb 19;63(4):1444-9.
- [28] Yahyazadeh R, Hashempour Z. Effects of hydrostatic pressure and temperature on the AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> high electron mobility transistors. *Journal of Interfaces, Thin films, and Low dimensional systems*. 2019; 2(2):183-94.
- [29] Cui P, Liu H, Lin W, Lin Z, Cheng A, Yang M, et al. Influence of different gate biases and gate lengths on parasitic source access resistance in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructure FETs. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2017 Jan 31;64(3):1038-44.
- [30] Wu YF, Keller S, Kozodoy P, Keller BP, Parikh P, Kapolnek D, Denbaars SP, Mishra UK. Bias dependent microwave performance of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> MODFET's up to 100 V. *IEEE Electron Device Letters*. 1997 Jun;18(6):290-2.
- [31] Brudnyi VN, Kosobutsky A V, Kolin N G. Effect of Pressure and Mechanical Stress on the Electronic Properties of AlN and GaN. *Physics of the Solid State*. 2011;53(4):679–88.
- [32] Dridi Z, Bouhafis B, Ruterana P. Pressure dependence of energy band gaps for Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N, In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N and In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>N. *New Journal of Physics*. 2002; 4:11.
- [16] Ambacher O, Majewski J, Miskys C, Link A, Hermann M, Eickhoff M, et al. Pyroelectric properties of Al (In) Ga<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> hetero- and quantum well structures. *Journal of physics: condensed matter*. 2002 Mar 22;14(13):3399.
- [17] Jin-Feng Z, Jin-Cheng Z, Yue H. Temperature dependence of Hall electron density of Ga<sub>N</sub>-based heterostructures. *Chinese Physics*. 2004 Aug 1;13(8):1334.
- [18] Fiorentini V, Bernardini F, Ambacher O. Evidence for nonlinear macroscopic polarization in III-V nitride alloy heterostructures. *Applied physics letters*. 2002 Feb 18;80(7):1204-6.
- [19] Perlin P, Mattos L, Shapiro NA, Kruger J, Wong WS, Sands T, et al. Reduction of the energy gap pressure coefficient of Ga<sub>N</sub> due to the constraining presence of the sapphire substrate. *Journal of Applied Physics*. 1999 Feb 15;85(4):2385-9.
- [20] Elibol K, Atmaca G, Tasli P, Lisesivdin S B. A numerical study on subband of In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>N/In<sub>N</sub>-based HEMT structure with low-indium ( $x < 0.01$ ) barrier layer. *Solid state communication*. 2013;162:8-12.
- [21] Bala KJ, Peter AJ, Lee CW. Simultaneous effects of pressure and temperature on the optical transition energies in a Ga<sub>0.7</sub>In<sub>0.3</sub>N/Ga<sub>N</sub> quantum ring. *Chemical Physics*. 2017;495: 42.
- [22] Yang M, Lin Z, Zhao J, Cui P, Fu C, Lv Y, et al. Effect of polarization coulomb field scattering on parasitic source access resistance and extrinsic transconductance in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructure FETs. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2016 Mar 3;63(4):1471-7.
- [23] Hashempour Z, Asgari A, Nikipar S, Abolhasani M, Kalafi M. Numerical performance evaluation of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> high electron mobility transistors including gate length effects. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2009 Aug 1;41(8):1517-21.
- [24] Chang Y, Zhang Y, Zhang Y. Thermal model for static current characteristics of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> high electron mobility transistors including self-heating effect. *Journal of Applied Physics*. 2006;99: 044501.
- [25] Goswami A, Trew RJ, Bilbro GL. Modeling of the gate leakage current in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HFETs. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2014 Feb 7;61(4):1014-21.

## پی نوشت

1. Gate Leakage
2. Transconductance
3. Self-Heating
4. Sub-band
5. Piezoelectric
6. Spontaneous
7. Dispersion
8. Saturation