

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری



دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشگاه صنعتی شاهرود

گزارش پایانی طرح پژوهشی

عنوان طرح

شبیه سازی ترانزیستور pHEMT با استفاده از
مدل موازنه انرژی کوانتومی

کد طرح : ۱۳۰۴

شهریور ۸۳

مجری طرح

سید ابراهیم حسینی

همکار

رحیم فائز

چکیده

در ترانزیستورهای pHEMT عرض شکاف انرژی در فاصله کمتر از طول موج الکترون تغییر می کند. این امر باعث می شود عملکرد این ادوات با ادوات الکترونیکی متداول تفاوت نماید. معمولاً در منحنی های مشخصه این ادوات نواحی متفاوت با ادوات معمولی دیده می شود که ناشی از پدیده های کوانتومی نظیر تونل زدن الکترون از سد پتانسیل است. رفتار الکترون در این ادوات همانند یک ذره نیست، بلکه ویژگی هایی از رفتار یک موج را نشان می دهد. طبیعت موج گونه الکترون، سبب می شود حرکت الکترون متأثر از پتانسیل گسترده ای از فضا باشد. به عبارت دیگر، اثر پتانسیل بر الکترون بصورت غیر محلی است. در شبیه سازی این ترانزیستورها لازم است اثر غیر محلی پتانسیل بر الکترون در نظر گرفته شود. در این تحقیق با استفاده از مدل موازنه انرژی کوانتومی، یک ترانزیستور pHEMT شبیه سازی شده است. اثر غیر محلی پتانسیل، بصورت یک تصحیح کوانتومی در معادلات انتقال در نظر گرفته شده است. شبیه سازی، شیب منفی در مشخصه خروجی ترانزیستور را نشان می دهد که نتیجه انتقال در فضای حقیقی (RST) است. وجود پتانسیل کوانتومی در معادلات انتقال، سد پتانسیل در مقابل حرکت الکترون را کاهش می دهد، در نتیجه امکان عبور بخشی از الکترونها را بر انرژی از سد پتانسیل و رفتن به نیمه هادی با نوار ممنوعه بزرگتر فراهم می شود. مدل موازنه انرژی بدون تصحیح کوانتومی، این پدیده را نشان نمی دهد.

کلمات کلیدی

معادلات موازنه، مدل موازنه انرژی کوانتومی، ترانزیستور pHEMT، انتقال در فضای حقیقی

پیش گفتار

این گزارش نتیجه طرح پژوهشی با عنوان "شبیه سازی ترانزیستور pHEMT با استفاده از مدل موازنه انرژی

کوانتومی" است که در تاریخ به تصویب شورای پژوهشی دانشگاه رسیده است.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	۱ - مقدمه
۳	۲ - معادلات انتقال
۳	۱-۲ معادلات موازنه نیمه کلاسیک
۵	۲-۲ معادلات موازنه کوانتومی
۶	۳-۲ مدل موازنه انرژی کوانتومی
۷	۳ - ترانزیستور pHEMT
۱۱	۴ - روش عددی حل معادلات
۱۲	۵ - نتایج شبیه سازی
۱۷	نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۸	مراجع
۲۰	ضمیمه ۱ - مقاله تهیه شده از طرح

برای بهینه سازی طراحی ادوات نیمه هادی لازم است شناخت کافی از رفتار این ادوات در اختیار باشد. با استفاده از شبیه سازی، حرکت حاملها در یک قطعه نیمه هادی بررسی شده و شناخت مناسبی از رفتار این ادوات بدست می آید. این امر به درک عملکرد و نیز طراحی بهتر این ادوات کمک زیادی می کند.

مبنای شبیه سازی ادوات نیمه هادی بر حل معادله انتقال بولتزمن^۱ استوار است [۱]. این معادله، نحوه حرکت حاملها در مکان و مومنتم را در طول زمان بیان می کند. معادله انتقال بولتزمن یک توصیف نیمه کلاسیک از حرکت الکترون در یک نیمه هادی است. از دیدگاه این معادله، الکترون یک ذره باردار است که میدان الکتریکی به آن نیرو وارد می کند و باعث حرکت آن می شود. این حرکت بصورت کلاسیک و بر اساس قانون نیوتن است.

در صورتی که معادله بولتزمن حل شود، می توان کمیت های مهم در یک قطعه نظیر جریان و توزیع پتانسیل را بدست آورد. برای حل معادله انتقال بولتزمن دو روش کلی وجود دارد، یکی روش آماری که به نام مونت کارلو شناخته می شود. در این روش حرکت حاملها در میدان الکتریکی با توجه به وجود عوامل برخورد دنبال می شود. روش دوم بدست آوردن ممانهای معادله بولتزمن و حل آنها است. مجموعه این ممانها به معادلات موازنه معروف هستند. معادلات موازنه شامل سه معادله بقا برای ذره، مومنتم و انرژی هستند. این معادلات بر اساس فرضهای نیمه کلاسیک بدست آمده اند و این فرضها تا وقتی برقرار هستند که بتوان الکترون را یک ذره کلاسیکی در نظر گرفت. استفاده از معادله انتقال بولتزمن و روش های مبتنی بر آن جهت شبیه سازی ادوات نیمه هادی متداول، کارآیی و دقت آنها نشان داده است.

دسترسی به سرعت و کارآیی بالا از اهداف تکنولوژی نیمه هادی است. در صورت دستیابی به فرکانس های بالاتر، طیف وسیعتری از فرکانس ها در اختیار خواهد بود و این امر زمینه کاربردهای تازه ای را فراهم می کند. همچنین افزایش روزافزون کاربردهای مخابراتی و افزایش حجم تبادل داده ها، استفاده از فرکانس های بالاتر به منظور دستیابی به طیف وسیعتر را الزامی می سازد.

^۱ Boltzmann Transport Equation (BTE)

یکی از راههای دستیابی به فرکانس های بالاتر، کوچک نمودن ابعاد ادوات نیمه هادی است. با کوچک شدن ابعاد یک ترانزیستور، زمان لازم برای عبور الکترون در طول قطعه کاهش می یابد. گذشته از آن، با کم شدن ابعاد یک ترانزیستور، مقدار عناصر مزاحم، مانند خازنهای ناخواسته در پیوندهای نیمه هادی تقلیل می یابد. هر دو اثر فوق به افزایش فرکانس کار ترانزیستور کمک می کند. از طرف دیگر، کوچک شدن ابعاد ادوات نیمه هادی این امکان را فراهم می کند که بتوان تعداد عناصر بیشتری را در یک تراشه جای داد. به این ترتیب ساخت تراشه هایی با کارایی و عملکرد بهتر میسر می گردد. هم اکنون ترانزیستورهایی با طول گیت کمتر از 100nm و ضخامت گیت در حد $1/5\text{nm}$ ساخته شده است. پیش بینی می شود طول گیت ترانزیستورها در تراشه های VLSI تا دو دهه آینده به 10nm برسد. البته این نکته را نیز باید اضافه نمود که نوع نیمه هادی بکار رفته در ساخت ادوات نیز نقش تعیین کننده ای در فرکانس کار آنها دارد.

اما با کوچک شدن ابعاد ادوات نیمه هادی، شرایطی بوجود می آید که عملکرد این ادوات را با ادوات متداول متفاوت می نماید. در ادواتی که ابعاد آنها از یک میکرومتر کمتر است، تغییرات قابل ملاحظه پتانسیل در فواصل اندک اتفاق می افتد. طول موج الکترون در GaAs در دمای محیط (300K) برابر 24nm و در دمای 4K برابر 49nm است. اگر پتانسیلی که بر الکترون اثر می کند در این فاصله تغییر قابل ملاحظه ای داشته باشد، رفتار دوگانه موج و ذره از الکترون دیده خواهد شد. این امر بخصوص در ادوات چند ساختاری^۱ مشهود است. در این ادوات، عرض نوار ممنوعه در فاصله چند ثابت شبکه تغییر می کند. این فاصله معمولاً از طول موج الکترون کمتر است. در این شرایط پدیده هایی همچون تونل زدن الکترون از سد پتانسیل رخ می دهد که باعث می شود رفتار این ادوات نسبت به ادوات همساختاری^۲ تفاوت پیدا کند. در این گونه ادوات معادلات نیمه کلاسیک دقت کافی را ندارند و لازم است تصحیح شوند.

هدف از این تحقیق شبیه سازی یک ترانزیستور pHEMT با استفاده از مدل موازنه انرژی کوانتومی است. این مدل از معادله لیوویل بدست آمده است. معادله لیوویل (که در فصل بعد بیشتر بررسی خواهد شد) مشابه معادله انتقال بولتزمن است، با این تفاوت که اثر پتانسیل در آن غیرمحلی است. در ادامه این گزارش، در بخش ۲

^۱) Heterostructure

^۲) Homostructure

معادلات موازنه، که نحوه حرکت الکترون در نیمه هادی را نشان می دهند، معرفی می گردد. در بخش ۳ معادلات مورد استفاده در شبیه سازی ارائه می شود و در بخش ۴ ترانزیستور pHEMT و خصوصیات آن معرفی می شود. در بخش ۵ نتایج شبیه سازی یک ترانزیستور pHEMT ارائه خواهد شد. در نهایت در بخش ۶ خلاصه ای از نتایج حاصل بیان می گردد.

۲- معادلات انتقال

در این بخش معادلات انتقال الکترون در یک نیمه هادی ارائه می شود. در ابتدا معادلات نیمه کلاسیک ارائه می شوند. این معادلات بر پایه معادله انتقال بولتزمن هستند که یک معادله نیمه کلاسیک است. سپس معادلات موازنه کوانتومی بررسی می گردند که همتای معادلات نیمه کلاسیک در ادوات کوانتومی هستند. در ادامه شکل ساده شده ای از این معادلات، که در شبیه سازی بکار رفته اند، معرفی خواهند شد.

۲-۱- معادلات موازنه نیمه کلاسیک

برای بررسی وضعیت حامل ها در یک نیمه هادی از یک تابع توزیع $f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$ استفاده می شود. این تابع، احتمال وجود الکترون در مکان \mathbf{r} ، مومنت \mathbf{p} و زمان t را نشان می دهد. اهمیت تابع توزیع f در این است که با داشتن آن می توان کمیت های مهم در یک قطعه نیمه هادی مانند چگالی حامل و جریان را بدست آورد. برای بدست آوردن چگالی حامل کافی است احتمال وجود الکترون در مومنت های مختلف را با هم جمع کنیم. با توجه به اینکه تعداد حالت های مجاز در فضای مومنت بسیار زیاد است، محاسبه مجموع حالت ها به یک انتگرال در فضای مومنت تبدیل می شود:

$$n = \frac{1}{4\pi^3 h^3} \int d^3 \mathbf{p} f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) \quad (1)$$

به همین ترتیب چگالی جریان و چگالی انرژی نیز بدست می آید:

$$\mathbf{J}_n = \frac{1}{4\pi^3 \hbar^3} \int d^3 \mathbf{p} \frac{-q\mathbf{p}}{m} f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) \quad (2)$$

$$w_n = \frac{1}{4\pi^3 \hbar^3} \int d^3 \mathbf{p} \frac{\mathbf{p}^2}{m} f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) \quad (3)$$

در معادلات (۱)-(۳)، چگالی حامل، \mathbf{J}_n چگالی جریان و w_n چگالی انرژی الکترون هستند و \hbar ثابت پلانک است. چگالی حامل، جریان و انرژی کمیت های اساسی در یک قطعه نیمه هادی هستند. با در اختیار داشتن این کمیت ها، نحوه عملکرد یک قطعه نیمه هادی مشخص خواهد شد. همچنین پارامترهای مداری ادوات را می توان با استفاده از این کمیت ها محاسبه نمود. به عنوان نمونه با داشتن چگالی حامل در زیر گیت در ولتاژهای مختلف، خازن های C_{gs} و C_{gd} قابل محاسبه هستند. این خازن ها در مدل سازی مداری ترانزیستورها بکار می روند. چنانچه معادلات انتقال بصورت تابع زمان حل شوند، رفتار گذرای ادوات نیز قابل بررسی خواهد بود.

در یک نیمه هادی عوامل مختلفی سبب تغییر حالت حامل ها و در نتیجه تغییر f می شوند. معادله ای که

اثر عوامل مختلف بر تابع توزیع را نشان می دهد، معادله انتقال بولتزمن^۱ (BTE) است:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla_r f + \mathbf{F} \cdot \nabla_p f = \left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_{coll} \quad (4)$$

معادله (۴) یک معادله پیوستگی برای تابع توزیع است. در این معادله \mathbf{v} سرعت الکترون، $\mathbf{F} = -q\mathbf{E}$ نیروی وارد بر الکترون و \mathbf{E} میدان الکتریکی است. جمله $\mathbf{v} \cdot \nabla_r f$ تغییر f در اثر سرعت انتقالی الکترون است. میدان الکتریکی بر الکترون ها نیرو وارد می کند و به آنها شتاب می دهد. این امر سبب تغییر مومنتم الکترون ها و در نتیجه تغییر f می شود. جمله $\mathbf{F} \cdot \nabla_p f$ این تغییر را نشان می دهد. جمله سمت راست در معادله (۴)، تغییر f در اثر عوامل برخورد است.

با حل معادله (۴) تابع توزیع بدست می آید و هنگامی که تابع توزیع در اختیار باشد می توان کمیت های

مورد نظر را محاسبه نمود. اما حل مستقیم این معادله مشکل است، بنابراین از روش های غیر مستقیم برای حل آن استفاده می شود.

معادلات موازنه یک روش غیر مستقیم برای حل BTE است. در این روش با استفاده از BTE سه معادله بقا برای ذره، مومنتم و انرژی بدست می آید [۱]. مجهول این معادلات چگالی حامل، مومنتم و انرژی است.

۲-۲- معادلات موازنه کوانتومی

معادله بولتزمن یک معادله نیمه کلاسیک است. این معادله برای شبیه سازی ادواتی مناسب است که ابعاد آنها از طول موج الکترون بسیار بیشتر باشد. اما در ادوات نیمه هادی که امروزه ساخته می شود، ابعاد مهم قطعه با طول موج الکترون قابل مقایسه است. مثلاً ضخامت گیت ترانزیستورها گاهی تا $1/2\text{nm}$ و طول گیت تنها چند نانومتر است [۲۰]. در این ادوات بجای تابع توزیع بولتزمن، از تابع توزیع ویگنر استفاده می شود. تابع توزیع ویگنر در سیستم های کوانتومی، همان نقش تابه توزیع بولتزمن در سیستم های کلاسیکی را دارد. معادله ای که از حل آن تابع توزیع ویگنر بدست می آید، مشابه BTE است و به معادله لیوویل معروف است:

(۵)

$$\frac{\partial f_w}{\partial t} + \frac{\mathbf{p}}{m} \nabla_r f_w = \frac{-1}{i\hbar} \frac{1}{(\pi\hbar)^3} \int d^3 \mathbf{p}' f_w(\mathbf{r}, \mathbf{p} - \mathbf{p}') \int d^3 \mathbf{y} \exp\left(\frac{2i}{\hbar} \mathbf{p}' \cdot \mathbf{y}\right) [V(\mathbf{r} + \mathbf{y}) - V(\mathbf{r} - \mathbf{y})]$$

که f_w تابع توزیع ویگنر است. معادله (۵) بدون جمله برخورد نوشته شده است. تفاوت اساسی معادله لیوویل با معادله انتقال بولتزمن این است که در این معادله اثر پتانسیل بر الکترون بصورت غیر محلی است. در معادله لیوویل، الکترون در هر نقطه، تحت تاثیر پتانسیل کل فضا قرار می گیرد. این ویژگی نمایشی از خاصیت موجی الکترون است. برای استفاده از معادله (۵) در شبیه سازی ادوات نیمه هادی، ابتدا مومنتم های آن را بدست می آوریم. به این ترتیب همانند معادلات نیمه کلاسیک، سه معادله بقا برای ذره، مومنتم و انرژی الکترون بدست می آید [۷] که به آنها معادلات موازنه کوانتومی گفته می شود. این معادلات مشابه معادلات نیمه کلاسیک هستند با این تفاوت که به معادله مومنتم و انرژی یک تصحیح کوانتومی اضافه می شود که اثر غیر محلی پتانسیل بر الکترون را در خود دارد.

¹) Boltzman Transport Equation

۲-۳- مدل موازنه انرژی کوانتومی

در مراجع [۶] و [۷] مومنتم های معادله لیوویل محاسبه شده و معادلات موازنه کوانتومی بدست آمده اند. بطور کلی در معادلات موازنه معمولاً به دلیل کوچک بودن، از جملات شامل سرعت صرف نظر می شود و شکل ساده تری از معادلات که به مدل موازنه انرژی معروف است بدست می آید. در شبیه سازی ترانزیستور معمولاً از این مدل استفاده می شود [۵]. بطور مشابه اگر در مومنتم های معادله لیوویل از جملات شامل سرعت صرف نظر کنیم، مجموعه معادلاتی بدست می آید که آن را مدل موازنه انرژی کوانتومی می نامیم. در ترانزیستور pHEMT اثرات کوانتومی ناشی از تغییر باند هدایت وجود دارد، و از مدل اخیر برای شبیه سازی این ترانزیستور استفاده شده است. این معادلات بصورت زیر هستند:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (6)$$

$$\nabla \mathbf{S} - \frac{\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}}{q} - \nabla \cdot (\mathbf{k} \nabla T) - \frac{\mathbf{J} \cdot \nabla E_q}{q} + \frac{n[3/2(T - T_0) - E_q/2]}{\tau_w} = 0 \quad (7)$$

$$\mathbf{J} = qn\mu_n \mathbf{E} + \mu_n \nabla [n(T - E_q)] \quad (8)$$

$$\mathbf{S} = -\frac{5}{2} \frac{\mathbf{J}(T - E_q)}{q} \quad (9)$$

$$E_q = \frac{\lambda^2}{2} \nabla^2 V_q \quad (10)$$

$$V_q(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi} \lambda} \int_0^1 \frac{z^2 dz}{\sqrt{(1-z^2)}} \int dy V(x+y) \exp\left(\frac{-y^2}{\lambda^2(1-z^2)}\right) \quad (11)$$

$$\lambda^2 = \frac{\hbar^2}{2mK_B T} \quad (12)$$

در معادلات (۶)-(۱۲) که $\mathbf{E} = \mathbf{E}_p + \mathbf{E}_c$ میدان الکتریکی ناشی از تغییر باند هدایت و $\mathbf{E}_p = -\nabla \Psi$

میدان الکترواستاتیک است و از حل معادله پواسن بدست می آید:

$$\nabla \psi^2 = -\frac{q(N_D - n)}{\epsilon} \quad (13)$$

همچنین J چگالی جریان، n چگالی حامل، T دما، μ موبیلیتی، q اندازه بار الکترون، k ضریب انتقال حرارت، τ_w زمان واهلش^۱ انرژی، V لبه باند هدایت (برحسب ولت) و S فلوی انرژی است.

۳- ترانزیستور pHEMT

نیمه هادیهای مرکب نسبت به نیمه هادیهای تک عنصری قابلیت های بسیار بیشتری دارند، از جمله اینکه معمولاً دارای موبیلیتی بیشتر نسبت به سیلیکن و ژرمانیم هستند. به این دلیل و نیز به دلیل امکان استفاده از ساختارهای چند لایه، ترانزیستورهایی با سرعت بسیار بالا قابل ساخت است.

در دو دهه اخیر برای رسیدن به سرعت بالا، توجه زیادی به ترانزیستورهای با موبیلیتی زیاد^۲ (HEMT) شده است. این ترانزیستورها با استفاده از ساختارهای چند لایه ساخته می شوند. در این ترانزیستورها یک لایه گاز الکترون دوبعدی^۳ در فصل مشترک دو نیمه هادی با نوار ممنوعه متفاوت ایجاد می شود. در این گاز دوبعدی، موبیلیتی الکترون بسیار زیاد است و سبب می شود ترانزیستورهایی با فرکانس گذر بالا بدست آید. این ترانزیستورها به نام^۴ MODFET،^۵ TEGFET و^۶ SDHT نیز شناخته می شوند. در این ترانزیستورها فرکانس گذر تا چند صد گیگاهرتز^[۲] و حداکثر فرکانس نوسان تا ۵۰۰ GHz بدست آمده است^[۹]. علاوه بر این با استفاده از ترکیبهای شامل نیتروژن ولتاژ و توان بیشتر نیز قابل حصول است^[۱۰ و ۱۱].

ساختار یک ترانزیستور HEMT بصورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است. در این ترانزیستور یک نیمه هادی با نوار ممنوعه بزرگ (مثلاً AlGaAs) نقش گیت ترانزیستور را دارد و یک نیمه هادی با نوار

^۱) Relaxation time

^۲) High Electron Mobility Transistor (HEMT)

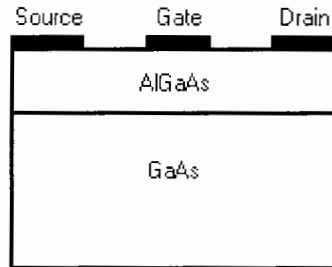
^۳) 2-Dimensional Electron Gas (2DEG)

^۴) Modulation Doped FET

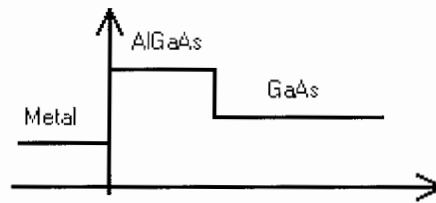
^۵) Tow Dimensional Electron Gas FET

^۶) Selectively Doped Heterojunction Transistor

ممنوعه کوچکتز (مثلاً GaAs) کانال ترانزیستور برای عبور جریان است. شکل (۲) نوار هدایت یک HEMT نوعی را نشان می دهد. در این شکل محور افقی عمق نیمه هادی است و در محل اتصال گیت رسم شده است.



شکل (۱) - ساختار شماتیک یک HEMT



شکل (۲) - نوار هدایت یک HEMT در حالت flat band

در مرز تماس دو نیمه هادی یک چاه پتانسیل تقریباً مثلثی تشکیل می شود که الکترونها در آن محبوس می شوند و یک گاز الکترون دویعدی را تشکیل می دهند. شکل (۳) این چاه پتانسیل را در محل تماس AlGaAs و GaAs نشان می دهد. به دلیل اینکه در ناحیه کانال ترانزیستور ناخالصی وجود ندارد موبیلیتی الکترون زیاد است و در نتیجه ترانزیستور حاصل نیز سرعت زیادی خواهد داشت.



شکل (۳) - چاه پتانسیل مثلثی در HEMT

در ساخت HEMT ترکیبهای متنوعی استفاده شده است. ساختار AlGaAs/GaAs از اولین ساختارهایی است که بکار رفته است. در این ساختار ثابت شبکه دو نیمه هادی AlGaAs و GaAs بسیار به هم نزدیک است و عدم تطابق در مرز تماس تقریباً وجود ندارد. اما در ساختارهایی همچون AlGaAs/InGaAs/GaAs ثابت شبکه بخشهای مختلف اندکی تفاوت دارد. به این دلیل به این ترانزیستورها¹ pHEMT گفته می شود. تفاوت ثابت شبکه در لایه های مجاور سبب ایجاد تنش در مرز تماس دو نیمه هادی می شود. این تنش باعث کاهش موبیلیتی و ایجاد سطوح انرژی ناخواسته می گردد. گاهی برای کاهش تنش در مرز تماس، تغییر ترکیب نیمه هادی بصورت تدریجی انجام می پذیرد [۹].

در سالهای اخیر ساختار InGaP/GaAs در ساخت pHEMT توجه زیادی را به خود جلب کرده است زیرا نسبت به ساختار AlGaAs/GaAs مشخصات بهتری دارد [۳]. یکی از برتریهای InGaP/GaAs نسبت به AlGaAs/GaAs گسستگی بیشتر در باند هدایت است که سبب می شود چگالی گاز الکترون دوبعدی بیشتر شود [۴]. همچنین این ترکیب نسبت به AlGaAs/GaAs مشخصات نویز بهتری دارد و ضریب Impact Ionization در آن کوچکتر است که حاصل آن ولتاژ شکست بیشتر در ترانزیستورهای ساخته شده است. ترکیبات شامل In معمولاً موبیلیتی بیشتری نیز نسبت به سایر ترکیبها دارند.

ساختار AlGaN/GaN نیز به دلیل داشتن شکاف ممنوعه بزرگتر مورد توجه است. شکاف ممنوعه بیشتر سبب می شود ولتاژ شکست ترانزیستورهای ساخته شده بیشتر باشد. بنابراین می توان ترانزیستور را با ولتاژ بیشتر بکار برد و در نتیجه توان بیشتری بدست آورد [۱۸]. همچنین در این ساختار امکان رسیدن به ابعاد کوچکتر وجود دارد. البته سرعت این ادوات نسبت به ساختارهای شامل In کمتر است. در ترانزیستورهای HEMT با ساختار AlGaN/GaN زمان سوئیچینگ کمتر از ۵۰ ps [۱۰] و فرکانس گذر بزرگتر از 100GHz [۱۹] بدست آمده است.

در ترانزیستورهای pHEMT تغییر عرض ناحیه ممنوعه در فاصله ای کمتر از طول موج الکترون اتفاق می افتد. به همین دلیل در جهت عمود بر گیت معمولاً تونل زدن الکترون به ناحیه با نوار ممنوعه بزرگتر مشاهده

¹) Pseudomorphic HEMT

می شود. تونل زدن الکترون از سد پتانسیل یک پدیده کوانتومی است، بنابراین در شبیه سازی این ترانزیستورها لازم است اثرات کوانتومی در معادلات انتقال الکترون وارد شود.

در شبیه سازی ترانزیستور HEMT گاهی برای سادگی از کوانتیزاسیون سطوح انرژی در چاه پتانسیل صرف نظر می شود [۱۳] که البته این امر از دقت شبیه سازی می کاهد. از طرفی در این ترانزیستور تغییر عرض نوار ممنوعه در یک بعد، عمود بر گیت، اتفاق می افتد. در داخل کانال ترانزیستور و موازی با گیت تغییر ناگهانی در پتانسیل وجود ندارد. بنابراین در طول کانال اثرات کوانتومی قابل اغماض است، اما در جهت عمود بر گیت اثرات کوانتومی وجود دارد. این امر باعث شده است تا در برخی شبیه سازی ها از روشهای شبه دوبعدی استفاده شود [۱۴ و ۱۵]. در این روشها، برای بدست آوردن سطوح کوانتیزه در چاه پتانسیل، در جهت عمود بر گیت معادله شرودینگر حل می شود، سپس در طول کانال از روشهای معمول دیگر استفاده می گردد. بنابراین در این روشها شبیه سازی دو بعدی بصورت دو شبیه سازی یک بعدی انجام می شود [۱۶]. این شبیه سازی ها ساده تر هستند، اما دقت روشهای دو بعدی را ندارند.

روش دیگر شبیه سازی HEMT، حل دو بعدی معادلات انتقال است. برای حل معادلات انتقال می توان از روش مونت کارلو [۹] یا معادلات موازنه استفاده کرد [۱۷]. در روش مونت کارلو اعمال اثرات کوانتومی مشکل است و تابحال تنها در شبیه سازی ادوات یک بعدی (بطور مشخص RTD) این کار انجام شده است. در شبیه سازی ترانزیستور، جهت بدست آوردن چگالی الکترون در چاه پتانسیل، در جهت عمود بر گیت از معادله شرودینگر استفاده می شود، سپس انتقال الکترون به روش مونت کارلو دنبال می شود.

در معادلات موازنه کوانتومی، بطور مستقیم نیازی به معادله شرودینگر نیست و معادلات بصورت دوبعدی (یا سه بعدی) حل می شوند. این ویژگی از مزایای این روش است، زیرا در جهت کانال ترانزیستور و نیز در جهت عمود بر آن از معادلات یکسانی استفاده می شود. اما در روش های شبه دوبعدی که از معادله شرودینگر در کنار معادلات کلاسیک استفاده می شود، در جهت کانال ترانزیستور و در جهت عمود بر آن، معادلات متفاوتی بکار می رود. البته لازم به ذکر است که در معادلات موازنه کوانتومی، اثرات کوانتومی بصورت یک تصحیح در معادلات کلاسیک وارد می شود.

۴- روش عددی حل معادلات موازنه

معادلات موازنه، معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی و غیرخطی هستند. برای این معادلات جواب تحلیلی وجود ندارد و تنها راه برای حل آنها استفاده از روش های عددی است. برای حل عددی یک معادله دیفرانسیل، معادله و حوزه حل آن گسسته می شوند. به این ترتیب معادله دیفرانسیل به معادله تفاضلی تبدیل می شود. حل عددی معادلات موازنه به دلیل غیرخطی و کنسرواتو بودن آنها بسیار مشکل است و اکثر روش های عددی متداول، برای این معادلات قابل استفاده نیستند. در این تحقیق برای گسسته نمودن معادلات انتقال از روشی مشابه روش کامل [۵] استفاده شده است که در ادامه توضیح داده می شود. برای بدست آوردن ضرایب لازم در معادلات گسسته، معادله جریان را در نظر می گیریم:

$$J = q\mu \left[nE + \frac{d(nw)}{qdx} \right] \quad (14)$$

که در معادله (۱۴) $w = T - E_q$. برای سادگی این معادله در یک بعد نوشته شده است. معادله (۱۴) را به

شکل زیر می نویسیم:

$$J = q\mu w \left[nE_w + \frac{dn}{qdx} \right] \quad (1-15)$$

$$E_w = \frac{E + dw / qdx}{w} \quad (2-15)$$

معادله (۱-۱۵) مشابه معادله نفوذ-رانش است، با این تفاوت که میدان الکتریکی با یک میدان معادل جایگزین شده است. برای بدست آوردن ضرایب گسسته جریان، فرض می کنیم در معادله (۲-۱۵) جمله E_w در یک فاصله مش ثابت باشد. در روش کامل، میدان الکتریکی و dw در یک فاصله مش ثابت فرض می شود. در اینجا ما فرض ثابت بودن انرژی w را نیز به آن اضافه نموده ایم. با توجه به اینکه معمولاً انرژی الکترون در یک فاصله مش تغییر چندانی نمی کند، این فرض منطقی به نظر می رسد. گذشته از آن شبیه سازی های انجام شده کارایی روش عددی پیشنهادی را نشان داده است. یک مزیت این روش، این است که تعداد حالت های حدی آن

نسبت به روش کامل کمتر است. این امر علاوه بر اینکه کد نمودن معادلات حاصل را ساده تر می نماید، سرعت برنامه شبیه ساز را نیز افزایش می دهد.

برای گسسته نمودن معادله (۱-۱۵)، در فاصله بین دو نقطه مجاور i و $i+1$ از مش، انتگرال می گیریم.

رابطه زیر برای J در فاصله $[i, i+1]$ بدست می آید:

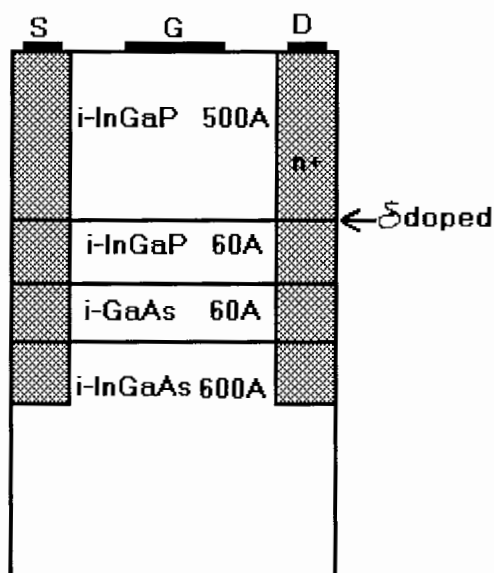
$$J = \frac{q\mu}{h} [D_1 n_i + D_2 n_{i+1}] \quad (16)$$

$$D_1 = \frac{-\Delta\Psi + \Delta w}{1 - \exp\left(\frac{-\Delta\Psi + \Delta w}{w}\right)} \quad D_2 = \frac{-\Delta\Psi + \Delta w}{1 - \exp\left(\frac{\Delta\Psi - \Delta w}{w}\right)} \quad (17)$$

فلوی انرژی نیز به روش مشابه گسسته می شود.

۵- نتایج شبیه سازی

در این تحقیق یک ترانزیستور pHEMT با ساختار InGaP/GaAs شبیه سازی شده است و مشخصه خروجی آن بدست آمده است. این ساختار در مرجع [۸] پیشنهاد شده است. شبیه سازی در دمای ۳۰۰ درجه انجام شده است. در جهت x (کانال ترانزیستور) ۱۸ نقطه با فواصل یکسان و در جهت y تعداد ۲۲ نقطه با فواصل متغیر تعریف شده است. در محل های نزدیک به گسستگی باند هدایت، طول مش کوچک انتخاب شده است (۲nm) و با دور شدن از محل گسستگی باند هدایت، طول مش با ضریب حدود ۱/۵ افزایش یافته است. شکل (۴) ساختار ترانزیستور مورد استفاده را نشان می دهد. در این ساختار، ناحیه InGaAs کانال ترانزیستور و ناحیه InGaP عایق گیت است که اتصال شاتکی گیت به آن انجام شده است. ناحیه GaAs یک ناحیه واسطه بین کانال و عایق است.

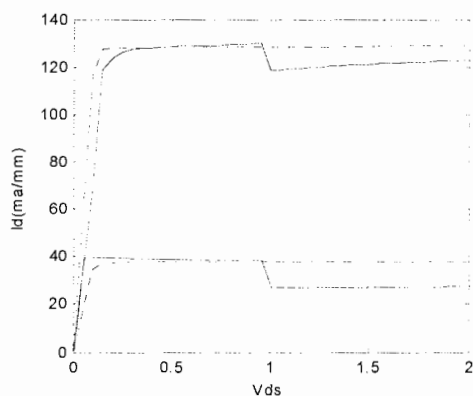


شکل (۴) - مشخصه خروجی ترانزیستور

در شکل (۵) مشخصه خروجی ترانزیستور برای $V_{GS}=0.5v$ و $V_{GS}=0v$ رسم شده است. منحنی های پر با اعمال پتانسیل کوانتومی بدست آمده اند و منحنی های خط چین بدون اعمال پتانسیل کوانتومی. با اعمال پتانسیل کوانتومی، شیب منفی در مشخصه خروجی ترانزیستور دیده می شود، در حالی که بدون آن این شیب منفی وجود ندارد. در ترانزیستورهای ساخته شده نیز پدیده RST و شیب منفی در مشخصه خروجی دیده شده است [۸]. مقدار جریان درین برای $V_{GS}=0$ در شبیه سازی با مرجع [۸] کاملاً همخوانی دارد، اما برای $V_{GS}=0.5$ مقدار جریان در مرجع مذکور حدود $80mA/mm$ است که در شبیه سازی حدود $120mA/mm$ بدست آمده است. تفاوت دیگری که بین نتایج شبیه سازی و ساخت وجود دارد این است که در ترانزیستور ساخته شده شیب منفی در مشخصه خروجی ترانزیستور از حدود $V_{GS}=1.5$ به بالا ظاهر می شود در حالی که در شبیه سازی انجام شده برای $V_{GS}=0$ نیز شیب منفی دیده می شود.

چند عامل را می توان دلیل تفاوت بین نتایج شبیه سازی با نتایج ساخت دانست. ۱- پارامترهای فیزیکی ترانزیستور ساخته شده کاملاً در اختیار نیست و این امر می تواند تفاوت زیادی در مقدار جریان ایجاد کند. ۲- شکل ترانزیستور ساخته شده بصورت شماتیک در [۸] رسم شده است، ترانزیستور ساخته شده ممکن است تفاوتی با این شکل شماتیک داشته باشد که باعث تفاوت نتایج ساخت با شبیه سازی می شود. ۳- پتانسیل

کوانتومی که در شبیه سازی بکار رفته است اثرات کوانتومی را قوی تر از مقدار واقعی پیش بینی می کند [۹]. ظاهر شدن شیب منفی در مشخصه خروجی برای V_{GS} کوچک را می توان به این دلیل دانست.



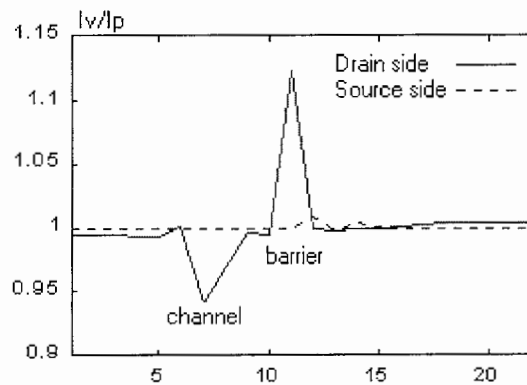
شکل (۵) - مشخصه خروجی ترانزیستور برای $V_{GS}=0$ و $V_{GS}=0.5V$

با اعمال پتانسیل بین درین و سورس، الکترونها بطور عمده از داخل کانال ترانزیستور عبور می کنند. هر چه ولتاژ درین-سورس V_{ds} بیشتر شود الکترون ها سریعتر و انرژی بیشتری پیدا می کنند. در ولتاژ درین-سورس بزرگ، الکترونها به اندازه کافی انرژی بدست می آورند (الکترونها گرم می شوند) و می توانند از سد پتانسیل بین دو نیمه هادی عبور کرده و به داخل نیمه هادی با عرض نوار ممنوعه بزرگتر منتقل شوند. در این نیمه هادی موبیلیتی الکترون کمتر است، در نتیجه جریان کاهش می یابد و شیب منفی در مشخصه خروجی ترانزیستور ظاهر می شود. این پدیده به انتقال در فضای حقیقی معروف است [۸ و ۱۲]. وجود شیب منفی در مشخصه خروجی ترانزیستور زمینه کاربردهای زیادی، از جمله اسیلاتور در فرکانسهای زیاد، مخلوط کننده، نوسانگر و چند برابر کننده فرکانس [۱۲] را ایجاد می کند.

نقش پتانسیل کوانتومی در معادلات این است که سبب می شود سد پتانسیل در مقابل الکترونها برای رفتن به نیمه هادی با نوار ممنوعه بزرگتر کاهش یابد. در نتیجه الکترونهای گرم^۱ که انرژی کافی دریافت نموده اند از کانال به ناحیه GaAs و سد InGaP وارد می شوند و چون این بخش موبیلیتی کمتری دارد جریان کاهش می یابد.

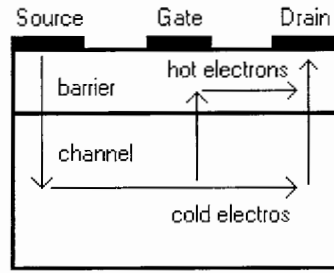
شکل (۶) نسبت جریان ترانزیستور قبل از کاهش جریان (I_p) به جریان ترانزیستور بعد از کاهش جریان (I_v) را نشان می دهد. نسبت I_v/I_p در قسمت سورس تقریباً یک است. بنابراین انتقال الکترون به سد، در قسمت سورس رخ نداده است. علت این امر واضح است، زیرا در قسمت سورس هنوز الکترونها انرژی کافی برای عبور از سد پتانسیل را کسب نکرده اند. اما در قسمت درین، نسبت I_v/I_p در سد پتانسیل افزایش و در کانال کاهش یافته است. دلیل این امر این است که الکترونها در طول مسیر سورس به درین، انرژی زیادی دریافت می کنند. تعدادی از این الکترونها وارد سد پتانسیل می شوند. در سد پتانسیل موبیلیتی الکترون کمتر از کانال است، بنابراین جریان کاهش می یابد.

شکل (۷) مسیر الکترونها برای رسیدن از سورس به درین را بصورت شماتیک نشان می دهد. الکترونی که انرژی کافی برای عبور از سد پتانسیل را دریافت نمایند، الکترون گرم گفته می شوند.



شکل (۶) - نسبت جریان ترانزیستور قبل و بعد از شیب منفی

^۱) Hot electrons



شکل (۷) - مسیر الکترونهاي سرد و گرم در ترانزیستور

نتیجه گیری و پیشنهادها

در این تحقیق یک ترانزیستور pHEMT با ساختار InGaP/GaAs/InGaAs شبیه سازی شده و نتایج آن با ترانزیستور ساخته شده مقایسه شده است. در شبیه سازی از یک مدل جدید که آنرا مدل موازنه انرژی کوانتومی می نامیم استفاده شده است. این مدل شیب منفی در مشخصه خروجی ترانزیستور را که حاصل پدیده RST است بخوبی نشان می دهد. اگر چه نتایج شبیه سازی با نتایج ساخت تفاوتی دارد اما با بهبود مدل و بکار بردن مقادیر واقعی تر برای پارامترهای فیزیکی، می توان انتظار داشت با شبیه سازی رفتار یک ترانزیستور ساخته شده را پیش بینی کرد.

- [1] Lundstrom M., Fundamentals of Carrier Transport, Modular Series on Solid State Devices V.X, Pierret R.F. and Neudeck G.W., Editors, Addison-Wesley Pub. Co., U.S.A., 1989.
- [2] Lu W., et.al., "AlGaN/GaN HEMPs on SiC with over 100 GHz ft and Low Microwave Noise," IEEE Trans. On ED, V.48, N.3, pp.581-5, 2001.
- [3] Besikci C., Bakit A. T., "Dielectric Screening Effects on Electron Transport in $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ Quantum Wells," JAP, V.88, N.3, pp.1504-10, 2000.
- [4] Yoon S.F., et.al., "Study of $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor Using a Two-Dimensional Device Simulator," Microelectronics Journal, N.30, pp.745-52, 1999.
- [5] Tang T., Jeong M., "Discretization of Flux Densities in Device Simulation Using Optimum Artificial Diffusivity," IEEE Trans. on CAD, V.14, N.11, pp.1309- 15, 1995.
- [6] Hosseini S.E. and Faez R., "Quantum Hydrodynamic Equations with Quantum Corrected Potential," Proc. 12th Int. Conf. Microelectronics, Tehran, Iran, p.191, 2000.
- [7] Hosseini S.E. and Faez R., "Novel Quantum Hydrodynamic Equations for Semiconductor Devices," Jap. J. Appl. Phys., V.42, pp.1300-4, 2002.
- [8] Chen Y-W., et.al., "High Breakdown Characteristic δ -Doped InGaP/InGaAs/AlGaAs Tunneling Real-Space Transfer HEMT," IEEE Trans. On ED, V.49, N.2, pp.221-5, 2002.
- [9] Happy H., et.al., "Numerical Analysis of Device Performance of Metamorphic $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0.3 \leq x \leq 0.6$) HEMT's on GaAs Substrate," IEEE Trans. On ED, V.45, N.10, pp.2089-95, 1998.
- [10] Li J.Z. and Jiang H.X., "Transient Characteristics of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ Heterojunction Field Effect Transistor," Appl. Phys. Lett., V.77, N.24, pp.4046-8, 2000.

- [11] Gaska R., et.al., "Two-Channel AlGa_N/Ga_N Heterostructure Field Effect Transistor for High Power Applications," J. Appl. Phys., V.85, N.5, pp.3009-11, 1999.
- [12] Kosina T.E., "Frequency Doubling in GaAs/AlGaAs Field Effect Transistor Using Real Space Transfer," IEEE Trans. On EDL, V.16, N.12, pp.545-7, 1995.
- [13] Simlinger T., et. al., "Simulation of Submicron Double-Heterojunction High Electron Mobility Transistors with MINIMOS-NT," IEEE Trans. on ED, V.44, N.5, 1997.
- [14] Wang T., Hsieh C.H., "Numerical Analysis of Nonequilibrium Electron Transport in AlGaAs/InGaAs/GaAs Pseudomorphic MODFET's," IEEE Trans. on ED, 37, 9, pp.1930-8, 1990.
- [15] Takano C., et.al., "A Nonequilibrium One-Dimensional Quantum-Mechanical Simulation for AlGaAs/GaAs HEMT Structures," IEEE Trans. on CAD, 9, 11, pp.1217-24, 1990.
- [16] Ng S.H., et.al., "A Two-Dimensional Self-Consistent Numerical Model for High Electron Mobility Transistor," IEEE Trans. on ED, 38, 4, pp.852-61, 1991.
- [17] Quay R., et.al., "Nonlinear Electron Transport and Device Performance of HEMTs," IEEE Trans. On ED, V.48, N.2, pp.210-6, 2001.
- [18] Keller S., et.al., "Gallium Nitride Based High Power Heterojunction Field Effect Transistors: Process Development and Present Status at UCSB," IEEE Trans. On ED, 48, 3, pp. 552-59, 2001.
- [19] Mahajan A., et.al., "Enhancement-Mode High Electron Mobility Transistors (E-HEMT's) Lattice-Matched to InP," IEEE Trans. On ED, 45, 12, pp. 2422-29, 1998.
- [20] Deleonibus S, et.al., "A 20-nm Physical Gate Length NMOSFET Featuring 1.2nm Gate Oxide, Shallow Implanted Source and Drain and BF₂ Pockets," IEEE EDL, 21, 4, pp. 173-5, 2000.

پیوست ۱

مقاله تهیه شده از طرح

از این طرح تحقیقاتی مقاله ای تهیه شده است که در کنفرانس مهندسی برق ایران، در اردیبهشت سال

۱۳۸۳ در مشهد، ارائه گردید.

شبیه سازی pHEMT با استفاده از مدل موازنه انرژی کوانتومی

سید ابراهیم حسینی^(۱)

رحیم فائز^(۲)

^(۱) دانشکده برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

^(۲) دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

چکیده:

در ترانزیستور های pHEMT عرض شکاف انرژی در فاصله کمتر از طول موج الکترون تغییر می کند. در شبیه سازی این ترانزیستورها لازم است اثر غیر محلی پتانسیل بر الکترون در نظر گرفته شود. در این مقاله با استفاده از مدل موازنه انرژی، یک ترانزیستور pHEMT شبیه سازی شده است. اثر غیر محلی پتانسیل، بصورت یک تصحیح کوانتومی در معادلات در نظر گرفته شده است. شبیه سازی، شیب منفی در مشخصه خروجی ترانزیستور را نشان می دهد که نتیجه انتقال در فضای حقیقی (RST) است. مدل موازنه انرژی بدون تصحیح کوانتومی، این پدیده را نشان نمی دهد.

کلمات کلیدی: pHEMT، شبیه سازی، Real Space Transfer، نیمه هادی

ترانزیستورهای با موبیلیتی زیاد (HEMT) دارای ساختار چند لایه از نیمه هادی های مرکب هستند. در این ترانزیستورها اتم های ناخالصی در یک نیمه هادی با نوار ممنوعه بزرگ تزریق می شوند که نقش عایق گیت را دارد. کانال ترانزیستور یک نیمه هادی با نوار ممنوعه کوچکتر است که الکترونها از نیمه هادی با نوار ممنوعه بزرگتر به این کانال وارد می شوند و یک لایه گاز الکترون دو بعدی را تشکیل می دهند. به دلیل عدم وجود ناخالصی، موبیلیتی الکترون در کانال ترانزیستور زیاد است. موبیلیتی زیاد و ابعاد کوچک باعث می شود ترانزیستورهایی با فرکانس قطع چند صد گیگا هرتز ساخته شود [۱].

در سالهای اخیر ساختار InGaP/GaAs در ساخت pHEMT توجه زیادی را به خود جلب کرده است زیرا نسبت به ساختار AlGaAs/GaAs مشخصات بهتری دارد [۳ و ۲]. یکی از برتریهای InGaP/GaAs نسبت به AlGaAs/GaAs گسستگی بیشتر در باند هدایت است که سبب می شود چگالی گاز الکترون دو بعدی بیشتر شود. در ترانزیستورهای pHEMT تغییر عرض ناحیه ممنوعه در فاصله ای کمتر از طول موج الکترون اتفاق می افتد. بنابراین در جهت عمود بر گیت اثرات کوانتومی همچون تونل زدن الکترون به ناحیه با نوار ممنوعه بزرگتر رخ می دهد. در شبیه سازی این ترانزیستورها لازم است اثرات کوانتومی در معادلات انتقال الکترون وارد شود. در این مقاله یک ترانزیستور pHEMT با ساختار InGaP/GaAs شبیه سازی شده است و مشخصه خروجی آن بدست آمده است. جهت شبیه سازی از مدل موازنه انرژی استفاده شده است و یک تصحیح کوانتومی بر اساس مومنتم های معادله لیوویل به این مدل اضافه شده است. مدل حاصل که آنرا مدل موازنه انرژی کوانتومی می نامیم پدیده RST را در مشخصه خروجی ترانزیستور نشان می دهد.

۲- مدل موازنه انرژی کوانتومی

معادلات موازنه، مومنتم های معادله انتقال بولتزمن هستند که بصورت سه معادله بقا برای ذره، مومنتم و انرژی بیان می شوند [۴]. به دلیل کوچک بودن، معمولاً از جملات شامل سرعت در این معادلات صرف نظر می شود و شکل ساده تری از معادلات که به مدل موازنه انرژی معروف است بدست می آید. در شبیه سازی ترانزیستور معمولاً از این مدل استفاده می شود [۵]. در ترانزیستور pHEMT اثرات کوانتومی ناشی از تغییر باند

هدایت وجود دارد، بنابراین لازم است انتقال الکترون بصورت کوانتومی بررسی شود. در مراجع [۶] و [۷] مومنتم های معادله لیویل محاسبه شده و معادلات موازنه کوانتومی بدست آمده اند. این معادلات مشابه معادلات نیمه کلاسیک هستند با این تفاوت که به معادله مومنتم و انرژی یک تصحیح کوانتومی اضافه می شود که اثر غیر محلی پتانسیل بر الکترون را در خود دارد. معادلات حاصل را مدل موازنه انرژی کوانتومی می نامیم:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{S} - \frac{\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}}{q} - \nabla \cdot (\mathbf{k} \nabla T) - \frac{\mathbf{J} \cdot \nabla E_q}{q} + \frac{n[3/2(T - T) - E_q/2]}{\tau_w} = 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = qn\mu\mathbf{E} + \mu\nabla[n(T - E_q)] \quad (3)$$

$$\mathbf{S} = -\frac{5}{2} \frac{\mathbf{J}(T - E_q)}{q} \quad (4)$$

$$E_q = \frac{\lambda^2}{2} \nabla^2 V_q \quad (5)$$

$$V_q(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\lambda} \int_0^1 \frac{z^2 dz}{\sqrt{(1-z^2)}} \int dy V(x+y) \exp\left(\frac{-y^2}{\lambda^2(1-z^2)}\right) \quad (6)$$

$$\lambda^2 = \frac{\hbar^2}{2mK_B T} \quad (7)$$

در معادلات (۱)-(۶) $\mathbf{E} = \mathbf{E}_p + \mathbf{E}_c$ که \mathbf{E}_c میدان الکتریکی ناشی از تغییر باند هدایت و $\mathbf{E}_p = -\nabla\Psi$ میدان

الکترواستاتیک است و از حل معادله پواسن بدست می آید:

$$\nabla^2 \Psi = -\frac{q(N_D - n)}{\varepsilon} \quad (8)$$

همچنین J چگالی جریان، n چگالی حامل، T دما، μ موبیلیتی، q اندازه بار الکترون، k ضریب انتقال

حرارت، τ_w زمان واهلش انرژی، V لبه باند هدایت (برحسب ولت) و S فلوی انرژی است.

۳- روش عددی حل معادلات

برای گسسته نمودن معادلات از روشی مشابه روش کامل [۵] استفاده شده است که در ادامه توضیح داده

می شود. برای بدست آوردن ضرایب لازم در معادلات گسسته، معادله جریان را در نظر می گیریم:

$$J = q\mu \left[nE + \frac{d(nw)}{qdx} \right] \quad (9)$$

که در معادله (9) $w=T-E_q$. برای سادگی معادله (9) در یک بعد نوشته شده است. این معادله را به شکل

زیر می نویسیم:

$$J = q\mu w \left[nE_w + \frac{dn}{qdx} \right] \quad (1-10)$$

$$E_w = \frac{E + dw/qdx}{w} \quad (2-10)$$

معادله (1-10) مشابه معادله نفوذ-رانش است، با این تفاوت که میدان الکتریکی با یک میدان معادل جایگزین شده است. با فرض ثابت بودن E_w در فاصله بین دو نقطه مجاور i و $i+1$ از مش، رابطه زیر برای J در فاصله $[i, i+1]$ بدست می آید:

$$J = \frac{q\mu}{h} [D_1 n_i + D_2 n_{i+1}] \quad (11)$$

$$D_1 = \frac{-\Delta\Psi + \Delta w}{1 - \exp\left(\frac{-\Delta\Psi + \Delta w}{w}\right)} \quad (12-الف)$$

$$D_2 = \frac{-\Delta\Psi + \Delta w}{1 - \exp\left(\frac{\Delta\Psi - \Delta w}{w}\right)} \quad (12-ب)$$

فلوی انرژی نیز به روش مشابه گسسته می شود.

۴- نتایج شبیه سازی

شکل (۱) مشخصات ترانزیستور pHEMT که در شبیه سازی استفاده شده است را نشان می دهد. شبیه سازی در دمای ۳۰۰ درجه انجام شده است. در جهت x (کانال ترانزیستور) ۱۸ نقطه با فواصل یکسان و در جهت y تعداد ۲۲ نقطه با فواصل متغیر تعریف شده است. در محل های نزدیک به گسستگی باند هدایت، طول مش کوچک انتخاب شده است (۲nm) و با دور شدن از محل گسستگی باند هدایت، طول مش با ضریب حدود ۱/۵ افزایش یافته است. در شکل (۲) مشخصه خروجی ترانزیستور رسم شده است. منحنی های پر با اعمال پتانسیل

کوانتومی بدست آمده اند و منحنی های خط چین بدون اعمال پتانسیل کوانتومی. با اعمال پتانسیل کوانتومی، شیب منفی در مشخصه خروجی ترانزیستور دیده می شود، در حالی که بدون آن این شیب منفی وجود ندارد.

با اعمال پتانسیل بین درین و سورس، الکترونها بطور عمده از داخل کانال ترانزیستور عبور می کنند. در ولتاژ درین-سورس بزرگ، الکترونها به اندازه کافی انرژی بدست می آورند و می توانند از سد پتانسیل بین دو نیمه هادی عبور کرده و به داخل نیمه هادی با عرض نوار ممنوعه بزرگتر منتقل شوند. در این نیمه هادی موبیلیتی الکترون کمتر است، در نتیجه جریان کاهش می یابد. این پدیده به انتقال در فضای حقیقی^۱ (RST) معروف است [۸]. وجود این پدیده سبب می شود در مشخصه خروجی ترانزیستور شیب منفی ظاهر شود که زمینه کاربردهای زیادی، از جمله اسیلاتور در فرکانسهای زیاد، را ایجاد می کند. در ترانزیستورهای ساخته شده نیز پدیده RST و شیب منفی در مشخصه خروجی دیده شده است [۸]. مشخصات ترانزیستور بکار رفته در شبیه سازی مشابه ترانزیستور مرجع [۸] است.

وجود پتانسیل کوانتومی در معادلات سبب می شود سد پتانسیل در مقابل الکترونها برای رفتن به نیمه هادی با نوار ممنوعه بزرگتر کاهش یابد. در نتیجه الکترونهايي که انرژی کافی دریافت نموده اند از کانال GaAs به InGaP وارد می شوند و چون این بخش موبیلیتی کمتری دارد جریان کاهش می یابد.

مقدار جریان درین برای $V_{GS}=0$ در شبیه سازی با مرجع [۸] کاملاً همخوانی دارد، اما برای $V_{GS}=0.5$ مقدار جریان در مرجع مذکور حدود 80mA/mm است که در شبیه سازی حدود 120mA/mm بدست آمده است. تفاوت دیگری که بین نتایج شبیه سازی و ساخت وجود دارد این است که در ترانزیستور ساخته شده شیب منفی در مشخصه خروجی ترانزیستور از حدود $V_{GS}=1.5$ به بالا ظاهر می شود در حالی که در شبیه سازی انجام شده برای $V_{GS}=0$ نیز شیب منفی دیده می شود.

چند عامل را می توان دلیل تفاوت بین نتایج شبیه سازی با نتایج ساخت دانست. ۱- پارامترهای فیزیکی ترانزیستور ساخته شده کاملاً در اختیار نیست و این امر می تواند تفاوت زیادی در مقدار جریان ایجاد کند. ۲- شکل ترانزیستور ساخته شده بصورت شماتیک در [۸] رسم شده است، ترانزیستور ساخته شده ممکن است تفاوتها

یی با این شکل شماتیک داشته باشد که باعث تفاوت نتایج ساخت با شبیه سازی می شود. ۳- پتانسیل کوانتومی که در شبیه سازی بکار رفته است اثرات کوانتومی را قوی تر از مقدار واقعی پیش بینی می کند [۹]. ظاهر شدن شیب منفی در مشخصه خروجی برای V_{GS} کوچک را می توان به این دلیل دانست.

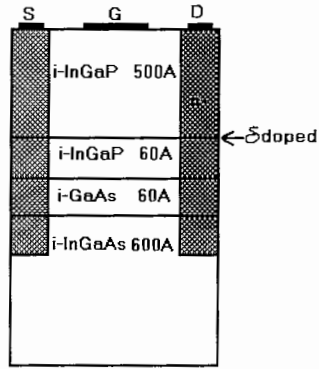
۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک ترانزیستور pHEMT شبیه سازی شده و نتایج آن با ترانزیستور ساخته شده مقایسه شده است. در شبیه سازی از یک مدل جدید که آنرا مدل موازنه انرژی کوانتومی می نامیم استفاده شده است. این مدل شیب منفی در مشخصه خروجی ترانزیستور را که حاصل پدیده RST است بخوبی نشان می دهد. اگرچه نتایج شبیه سازی با نتایج ساخت تفاوتهایی دارد اما با بهبود مدل و بکار بردن مقادیر واقعی تر برای پارامترهای فیزیکی، می توان انتظار داشت با شبیه سازی رفتار یک ترانزیستور ساخته شده را پیش بینی کرد.

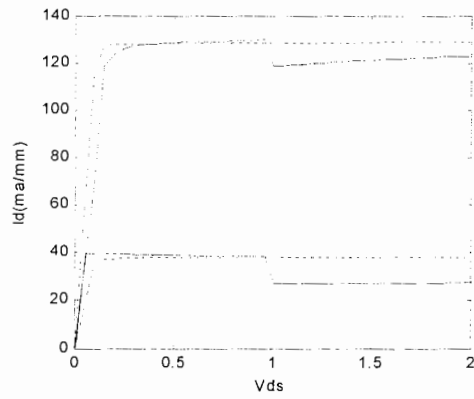
- [1] Simlinger T., et. al., "Simulation of Submicron Double-Heterojunction High Electron Mobility Transistors with MINIMOS-NT," IEEE Trans. on ED, V.44, N.5, 1997.
- [2] Besikci C., Bakit A. T., "Dielectric Screening Effects on Electron Transport in $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ Quantum Wells," JAP, V.88, N.3, pp.1504-10, 2000.
- [3] Yoon S.F., et.al., "Study of $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor Using a Two-Dimensional Device Simulator," Microelectronics Journal, N.30, pp.745-52, 1999.
- [4] Lundstrom M., Fundamentals of Carrier Transport, Modular Series on Solid State Devices V.X, Pierret R.F. and Neudeck G.W., Editors, Addison-Wesley Pub. Co., U.S.A., 1989.
- [5] Tang T., Jeong M., "Discretization of Flux Densities in Device Simulation Using Optimum Artificial Diffusivity," IEEE Trans. on CAD, V.14, N.11, pp.1309-1315, 1995.
- [6] Hosseini S.E. and Faez R., "Quantum Hydrodynamic Equations with Quantum Corrected Potential," Proc. 12th Int. Conf. Microelectronics, Tehran, Iran, p.191, 2000.
- [7] Hosseini S.E. and Faez R., "Novel Quantum Hydrodynamic Equations for Semiconductor Devices," Jap. J. Appl. Phys., V.42, pp.1300-4, 2002.
- [8] Chen Y-W., et.al., "High Breakdown Characteristic δ -Doped $\text{InGaP}/\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}$ Tunneling Real-Space Transfer HEMT," IEEE Trans. On ED, V.49, N.2, pp.221-5, 2002.

[9] شبیه سازی ادوات نیمه هادی زیر میکرونی با استفاده از معادلات موازنه کوانتومی، سید ابراهیم

حسینی، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۰.



شکل (۱) - ساختار ترانزیستور pHEMT مورد استفاده در شبیه سازی



شکل (۲) - مشخصه خروجی ترانزیستور