مدل سازی مشخصات I-V ترانزیستور GaN 150 HEMT در دمای بالا با استفاده از روش یادگیری فعال فازی

حیدر نبی[1]، محمد جوادیان[2]

[1] دانشجوی کارشناسی مهندسی کامپیوتر گرایش سخت افزار، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه
nabiheidar@yahoo.com

[2] استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه
mo.javadian@gmail.com

چکیده

در این مقاله یک مدل سازی غیر خطی در دمای بالا را برای ویژگی‌های I-V ترانزیستور GaN 150 HEMT مطرح می‌کنیم. مشخصات I-V ترانزیستور تشکیل یک مجموعه داده را می‌دهند که مدل سازی می‌شوند. مدل سازی داده‌ها در رنج دمایی ۲۵ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از الگوریتم فازی، روش یادگیری فعال (ALM) انجام می‌شود. آزمایشات روی یک دستگاه GaN 150 با عرض ۴۰ میکرو متر صورت گرفته است و به همین ترتیب مجموعه‌ای از اندازه گیری‌ها برای ساخت مدل دستگاه بدست آمده و مورد بهره برداری قرار گرفته‌اند. روش مورد نظر برای مدل سازی با استفاده از توانایی آن در پیش‌بینی ویژگی‌های I-V در دمای گفته شده و محاسبه پارامترهای خطا ،ارزیابی شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که مدل ویژگی‌های دستگاه را بر اساس محاسبه‌ی پارامترهای خطا، درست پیش‌بینی می‌کند.

کلمات کلیدی

روش یادگیری فعال، GaN 150 HEMT، I-V، منطق فازی

۱- مقدمه

استفاده از الکترونیک مبتنی بر سیلیکون معمولی (Si) در کاربردهایی مانند موتورهای هوافضایی، عمق حفاری و تولید انرژی با توجه به دمای بالای محیط اطراف دستگاه‌ها، مشکل ساز می‌شود. وقتی دستگاه‌ها چنین در معرض دمای شدید حامل آزاد خود قرار می‌گیرند تحرک و همچنین غلظت حامل ذاتی کاهش می‌یابد، جریان نشت پیوند p-n و جریان نشت ترموئنیک افزایش می‌یابد که منجر به تخریب قابل توجهی در ویژگی‌های دستگاه‌ها می‌شود، تا زمانی که دیگر کار نمی‌کنند [1].

برای استفاده از الکترونیک مبتنی بر سیلیکون در محیط‌های با دمای بالا، یک سربار اضافی در فرم سیستم‌های خنک کننده، سیم‌های اتصال، بسته‌بندی و روکش کردن برای محافظت از دستگاه در مقابل دمای محیط اطراف و حفظ قابلیت آن مورد نیاز است. که این خود منجر به افزایش وزن می‌شود که مطلوب نیست و ممکن است غیر عملی باشد، به خصوص در کاربردهای هوا فضا. بدین ترتیب، به مواد نیمه هادی نیاز است که می‌تواند جایگزین سیلیکون شود و در دمای بالا کار کند.

نیمه‌هادی های باند وسیع مانند GaN HEMT در درجه اول برای کاربردهای با قدرت بالا و RF توسعه یافته‌اند. با این حال، توانایی آن‌ها برای عملکرد در مقادیر دمایی بالاتر (بیش از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) آن‌ها را برای دستگاه‌های مبتنی سیلیکون در کاربردهای با دمای بالا، یک جایگزین عالی می‌کند. خصوصیات و ثبات خواص الکتریکی (مشخصات I-V) ترانزیستورهای GaN 150 HEMT ارائه شده نشان می‌دهد که دستگاه می‌تواند در محدوده دمای بین ۲۵ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به درستی عمل کند.

هزینه بالای ساخت مدارهای مجتمع، مدل سازی ویژگی‌های دستگاه‌های الکترونیکی برای تست یکپارچگی مدارهای طراحی شده و پیش بینی آن‌ها قبل از ساخت توسط شبیه ساز مدار را مورد نیاز می‌کند.

چندین مدل برای ترانزیستورهای GaN HEMT توسعه داده شده‌اند. اکثر این مدل‌ها تجربی هستند، و ساخت آن‌ها براساس یک فرآیند القا است، کاربر باید یک حدس اولیه از پارامترهای تجربی ارائه بدهد و اعمال برخی مفروضات که ممکن است نادرست باشند. علاوه بر این، این مدل‌ها به طور معمول برای رنج‌های کم دما مانند کاربردهای RF طراحی شده‌اند. محققان و متخصصان به مدل‌های GaN HEMT که می‌تواند از داده‌های جمع آوری شده ساخته شده باشند، توجه زیادی دارند [2-1].

در این پروژه یک مدل غیر خطی برای مدل سازی ویژگی‌های I-V ترانزیستور GaN HEMT با استفاده از روش یادگیری فعال فازی ارائه شده است. در این مدل سازی ویژگی‌های I-V ترانزیستور که به صورت تجربی بدست آمده‌اند به تولباکس روش یادگیری فعال اعمال می‌شوند و انتظار می‌رود الگوریتم ویژگی‌های ترانزیستور را به درستی پیش‌بینی کند.

ساختار این مقاله به شرح زیر است: بخش دوم مواد و روش‌های مورد استفاده در آزمایش را توصیف می‌کند. نتایج مدل سازی دستگاه در بخش سوم ارائه شده است، و بحث اصلی در بخش چهارم شرح داده می‌شود و بخش پنجم نتیجه گیری مقاله را نشان می‌دهد.

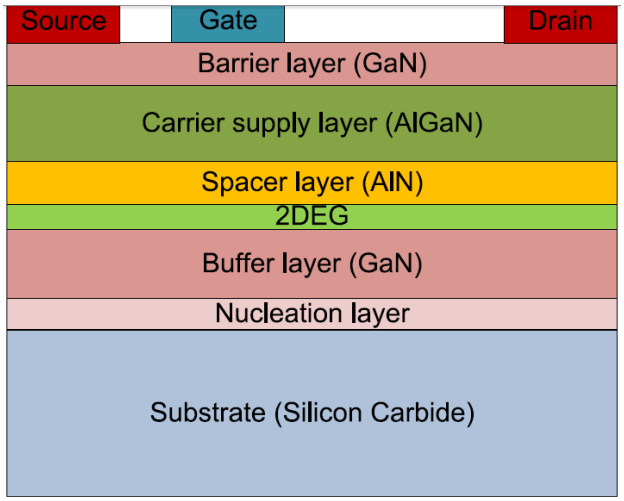
۲- ساختار دستگاه و آزمایش ویژگی‌های دستگاه

ترانزیستور تحریک الکترونی بالا (HEMT) نوعی ترانزیستور اثر میدانی و یا اصطلاحا همان IFET است که طوری طراحی شده که در فرکانس های مایکروویو کارآیی بالایی داشته باشد. از خصوصیات ویژه این ترانزیستور ضریب نویز کم در فرکانس های بالا و مایکروویو است. این ترانزیستورها به علت تحرک الکترونی بالا در فرکانس های بالا و نوسان کننده های مایکروویو عملکرد بسیار مطلوبی دارد و میزان نویز پذیری آن در این مدارات بسیار پایین است. مکانیسم کوانتومی این ترانزیستور مبتنی بر نوع مواد سازنده آن است که دو نوع از ترانزیستور HEMT را می توان با آن ساخت. مواد سازنده این ترانزیستور از قبیل: گالیوم- آرسنیک- ایندیوم- فسفات- نیترات- آلومنیوم می باشد. دو نوع ترانزیستور pHEMT و mHEMT را داریم و می توان با آنها مدارات فرکانس بالا را با نویز کم و توان بالا طراحی و شبیه سازی کنیم [2].
ترانزیستور HEMT از پیوند بین دو نیم‌رسانای متفاوت با گاف انرژی متفاوت بهره می‌برد. دو نیم‌رسانایی که اغلب در این ترانزیستورها به کار می‌روند گالیم آرسنید (GaAs) و آلومینیم گالیم آرسنید (AlGaAs) هستند.

از این نوع ترانزیستور در تقویت‌کننده‌های با نویز کم، تلسکوپ‌های رادیویی و نجومی و تقویت‌کننده‌های مایکروویو استفاده می‌شود. در این مقاله هدف شبیه سازی GaN HEMTS است. بخش مقطعی دستگاه در شکل (۱) نشان داده شده است که:

I. شامل یک سیلیکون کاربید (SiC) است که یک نیمه هادی سازگار شکاف باند وسیع با کاربردهای با درجه حرارت بالا است، که به عنوان یک زیرلایه نیمه هادی سازگار با کاربردهای با درجه حرارت بالا که به عنوان یک زیرلایه برای ارائه ناهماهنگی شبکه و رسانایی گرمایی بالا استفاده می‌شود.
II. یک لایه ی هسته ای که برای ایجاد کیفیت خوب و قطبیت بالای لایه بافر GaN بالاتر، روی زیرلایه SiC قرار دارد.
III. یک لایه بافر که کیفیت رشد مواد را بهبود می بخشد و انزوا دستگاه را حفظ می کند.
IV. یک لایه 2DEG به دنبال یک لایه AlN برای ایجاد فضایی برای حامل تزریق شده از لایه تامین کننده حامل (AlGaN) در بالا، آمده است.
V. یک لایه مانع GaN برای محافظت از AlGaN در مقابل برخوردهای لغزشی

برای آزمایش مقادیر ولتاژ و جریان ترانزیستور در معرض دماهای بالای ۲۵ تا ۴۰۰ درجه سانتی گراد قرار داده شده است. و به در دماهای مختلف I_{DS} به ازاء دما، V_{DS} و V_{GS} های مختلف اندازه گیری شده است. [2].



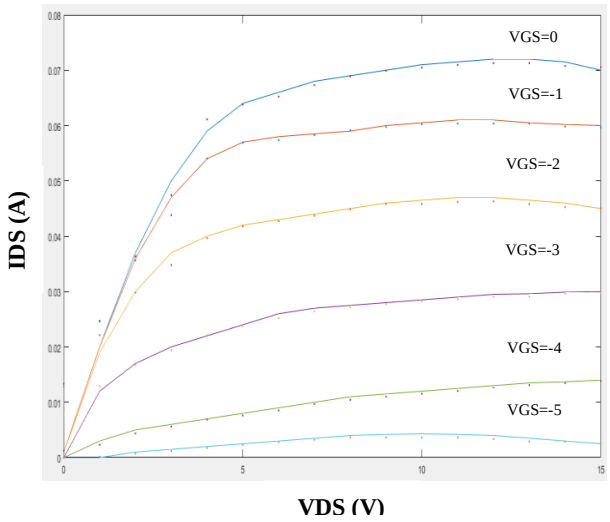
شکل (۱) بخش مقطعی GaN 150 HEMT

۳- مدل سازی دستگاه با استفاده از روش یادگیری فعال

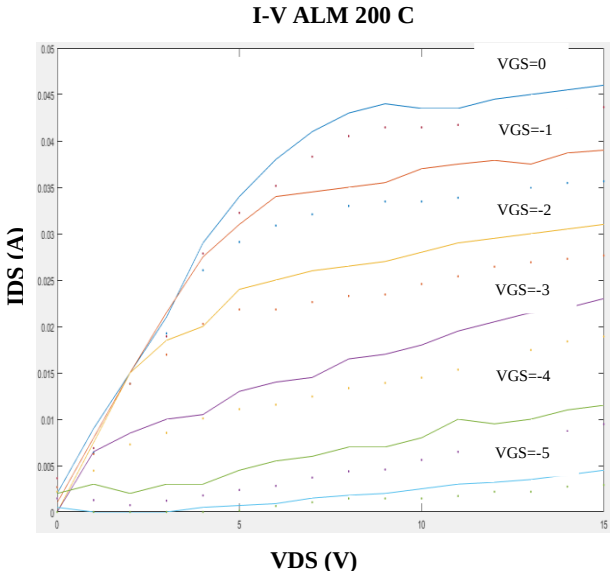
روش یادگیری فعال (ALM) یک سیستم چندورودی تک‌خروجی (در اینجا سه ورودی یک‌خروجی) را به عنوان ورودی می‌گیرد. رفتار سیستم بر اساس چند ورودی مشخص است و ALM آن را به صورت یک سطح در فضا در نظر می‌گیرد. ALM رفتار خروجی سیستم را بر اساس هر یک از ورودی‌ها بدست می‌اورد، یعنی آن را به صورت چند زیرسیستم تک‌ورودی تک‌خروجی مدل می‌کند. در این روش برای بدست آوردن رابطه خروجی y با هر ورودی ابتدا سطح مورد بحث را در یک صفحه

گسترنده قطره جوهر تصویر می‌کند. با این کار به تعدادی نقاط پراکنده در صفحه می‌رسد، که میزان پراکندگی این نقاط در صفحه نشان دهنده میزان اهمیت آن ورودی است. یعنی نشان می‌دهد آن ورودی چقدر در خروجی سیستم موثر بوده است. با این کار ALM الگوهایی مناسب از رابطه ورودی و خروجی را در صفحه گسترنده قطره جوهر بدست می‌آورد و تشکیل یک ساختار شبکه‌ای می‌دهد. به ازای همه‌ی صفحه‌ها دو پارامتر مسیر باریک و پراکندگی بدست می‌آیند. در آخر تمام الگوهای بدست آمده را با هم جمع میکند و رابطه خروجی کلی سیستم را بر اساس همه ورودی‌ها بدست می‌آورد (یاد می‌گیرد).

۴- نتایج



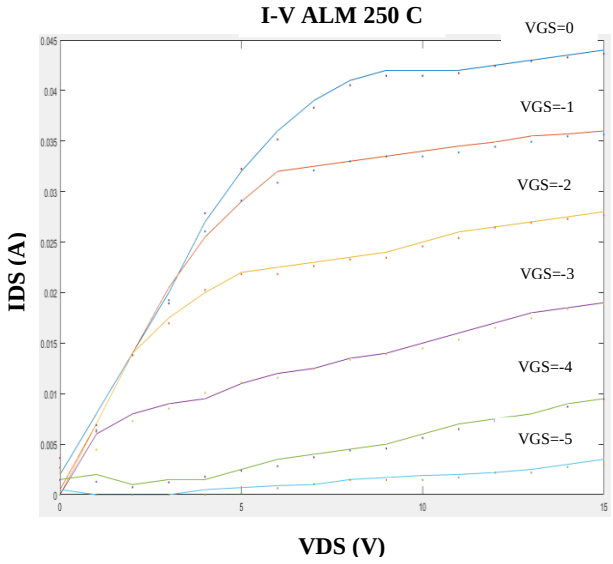
شکل (۲) مدل سازی داده‌های با دمای 25 C و VGS از 0 to -5 V



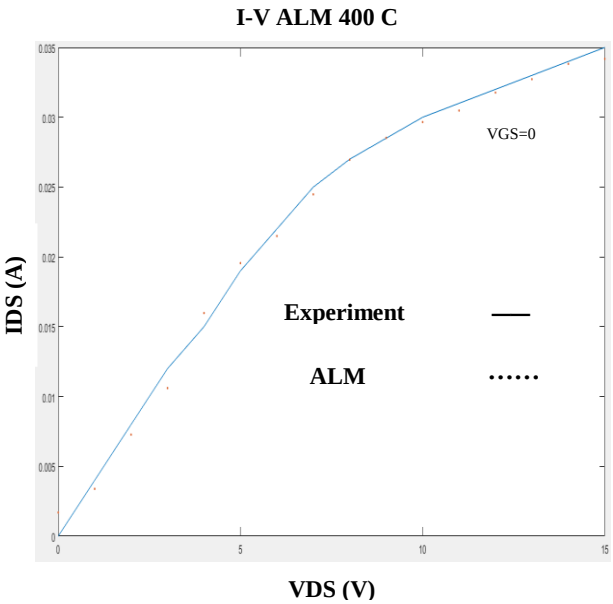
شکل (۳) مدل سازی داده‌ها در دمای 200 C

در این مدل سازی سه ورودی دما، VGS و VDS و فقط یک خروجی IDS به مدل اعمال می‌شوند. بعد از اتمام فاز یادگیری فرمول زیر ساختار شبکه‌ای مدل شده را نشان می‌دهد، که در آن β_i میزان پراکندگی استخراج شده از صفحه گسترنده قطره جوهر و ψ_{x_i} مسیر باریک استخراج شده می‌باشد [۳].

$$\mathrm{IDSn} = \sum_{i=1}^{N} \beta_i \psi_{x_i}(x_i) \qquad (۱)$$



شکل (۴) مدل سازی داده‌ها در دمای 250 C



شکل (۵) مدل سازی داده‌ها در دمای 400 C و VGS = 0 V

شکل (۲) مدل سازی ویژگی‌های I-V دستگاه توسط مدل ALM را در دمای 25 C و VGS از 0 to -5 V نشان می‌دهد که در آن نمودارها داده‌های حاصل از آزمایش تجربی و ورودی مدل ALM هستند و نمودارهای نقطه‌چین پیش‌بینی مدل برای خروجی داده‌ها را نشان می-دهد. با توجه به پیش‌بینی مدل متوجه می‌شویم که مدل ALM پیش-بینی دقیق و نزدیکی به خروجی واقعی داده‌ها که IDS است، انجام داده است. همانند شکل (۲) ، شکل (۳) مدل سازی داده‌ها در دمای 200 C و شکل (۴) مدل سازی داده‌ها در دمای 250 C را نشان می‌دهد. در نهایت شکل (۵) مدل سازی داده‌ها در دمای 400 C و فقط به ازای VGS = 0 V را نشان می‌دهد. همچنین در جدول (۱) پارامترهای خطای اندازه گیری شده در دماهای مختلف هنگام مدل سازی دستگاه آمده است.

جدول (۱) پارامترهای اندازه گیری شده خطا

	FVU	MSE	VAF	FVU_grid
25 C	۰,۰۱۰۹۰۲	۰,۰۰۲۵۰۷۳	۹۸,۸۶۴۵	۰,۰۱۱۱۳۹
200 C	۰,۰۰۲۶۷۳۶	۰,۰۰۰۷۵۲۰۸	۹۹,۷۵۸۹	۰,۰۰۲۳۰۵۹
250 C	۰,۰۰۲۲۴۹۸	۰,۰۰۰۶۶۰۸۸	۹۹,۷۹۷	۰,۰۰۱۸۲۱۵
400 C	۰,۰۰۴۵۵۹۵	۰,۰۰۰۷۳۹۰۱	۹۹,۵۵۶۳	۰,۰۰۳۹۷۳۵

۵- تحلیل مدل سازی

داده های تجربی در شش حالت مختلف VGS در محدوده 0 to -5 V انتخاب شدند. همچنین به ازای چهار دمای مختلف ۲۵، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۴۰۰ درجه سانتی گراد و به ازای هر یک از مقادیر VGS مقادیر VDS از 0 to 15 V انتخاب و خروجی ها (IDS) نیز انتخاب شدند.

روش یادگیری فعال با داده‌ها به ازای VGS از 0 to -5 V و مقادیر دمایی مختلف آموزش داده شد. همچنین مدل توانست بر اساس این آموزش پیش‌بینی دقیق و واقعی از داده‌های داده شده را به دست آورد. با توجه به آموزش دیدن مدل و بدست آوردن روابط بین سه ورودی و خروجی، مدل می‌تواند به ازای ورودی‌های مختلف دیگر و در دماهای تصادفی دیگر پیش‌بینی دقیقی از خروجی (IDS) ارائه دهد. با توجه به این نتایج می‌توان گفت ALM می‌تواند همانند سایر مدل‌های یادگیری و الگوریتم‌های فازی دیگر عمل کند.

۶- نتیجه گیری

ویژگی‌های I-V اندازه گیری شدند. داده‌های اندازه گیری شده به یک سیستم سه‌ورودی تک‌خروجی تبدیل شدند و به ALM اعمال شدند. ALM بر اساس خاصیت یادگیری آن و قوانین فازی حاکم بر آن توانست روابط بین ورودی‌ها و خروجی را بدست آورد. بعد از آموزش ALM داده‌ها برای تست دوباره به آن اعمال شدند تا خروجی را تخمین بزند. که توانست پیش‌بینی واقعی از خروجی را بدست آورد. با توجه به این نتایج می‌توان ALM را مانند سایر الگوریتم‌های فازی و تکنیک‌های یادگیری ماشین برای مدل سازی سیستم‌های پیچیده معرفی کرد. در مدل سازی انجام شده سیستم شامل سه‌ورودی VGS، VDS، دما و فقط یک خروجی بود، می‌توان در آینده برای قدرتمند کردن مدل سازی پارامترهای دیگری را نیز به عنوان ورودی به سیستم اعمال کرد مانند نوع ترانزیستور و غیره

مراجع

[1] H. Ilatikhameneh, R. Ashrafi, S. Khorasani, "*Simulation and optimization of HEMTs*", 2016 3rd International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications (ACTEA), Beirut Lebanon, July 2016

[2] A. Abubakr, A. Hasan, A. Ragab, S. Yacout, Y. Savaria, and M. Sawan "*High-Temperature Modeling of the I-V Characteristics of GaN150 HEMT Using Machine Learning Techniques*", 2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Florence Italy, May 2018

[۳] یاسمن مکری و سعید باقری شورکی، "بررسی الگوریتم فازی یادگیری پویا و کاربرد های آن در مدل سازی و طراحی کنترل کننده ها" ، ششمین کنفرانس سراسری سیستم‌های هوشمند، ایران دانشگاه صنعتی شرف، تهران، ۱۳۸۳