

شبیه‌سازی گاز دوبعدی در AlGa_N/Ga_N HEMT و بررسی ولتاژ شکست آن

رحیم فائز (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف

از چند ساختار AlGa_N/Ga_N در ادوات قدرت استفاده می‌شود بنابراین داشتن چگالی جریان و ولتاژ شکست بسیار مهم است. در قسمت اول این نوشتار، اثر پارامترهای مختلف بر چگالی گاز دوبعدی الکترون بررسی شده و بهترین حالت‌ها مشخص شده‌اند. همچنین نشان داده شده است که در بعضی حالات حفره‌ها در سطح فوقانی AlGa_N جمع می‌شوند، اما به علت وجود ترازهای تله در هیچ آزمایشی مشاهده نشده‌اند. در بخش بعدی اثر وجود تله‌ها بر چگالی گاز دوبعدی مورد بحث قرار گرفته است. در انتها درباره‌ی روش‌های زیادکردن ولتاژ شکست بحث شده و با شبیه‌سازی برای یک حالت نحوه‌ی زیادشدن ولتاژ شکست نشان داده شده است.

مقدمه

دوبعدی الکترون و همچنین اثر ترازهای تله مورد بررسی واقع شده است. سپس درباره‌ی روش‌های زیادکردن ولتاژ شکست بحث شده، و با شبیه‌سازی یک حالت، زیاد شدن ولتاژ شکست نشان داده شده است.

ادوات ساخته شده با Ga_N به علت داشتن E_g نسبتاً زیاد می‌توانند در درجه حرارت زیاد و ولتاژ بالا کار کنند. به علت اختلاف زیاد E_c بین Ga_N و AlGa_N (تا 1.78 eV الکترون ولت برای AlN) [۱] همراه با میدان‌های قطبی‌شدگی پیزو الکتریک و نقطه‌یی باعث می‌شود که چگالی دوبعدی زیاد (حدود 10^{13} cm^{-2}) در مرز دو نیمه‌هادی تشکیل شود. [۲] محاسبات مونته‌کارلو نشان می‌دهد که سرعت الکترون می‌تواند تا $2/5 \times 10^7 \text{ cm/sec}$ برسد. [۱] این موضوع باعث می‌شود که چگالی جریان 1.48 A/mm دست‌یافتنی باشد. [۴] همچنین برای این ادوات g_m با مقدار 400 ms/mm [۵]، و فرکانس قطع بیشتر از 120 GHz [۶] به دست آمده است. به علت بزرگ بودن میدان الکتریکی بحرانی در Ga_N (2 MV/cm) [۷] دست‌یابی به ولتاژ شکست بیشتر از 900 V [۸]، و توان بالای 16.5 W/mm امکان‌پذیر است. [۹]

اثر عوامل مختلف بر چگالی گاز دوبعدی الکترون در HEMT ساخته شده از AlGa_N/Ga_N سه عامل در ایجاد گاز دوبعدی الکترونی اثر دارد. دو تا از این عوامل عبارت‌اند از قطبی‌شدگی نقطه‌یی و قطبی‌شدگی پیزو الکتریک، که برای محاسبه‌ی اثر آنها از روابط داده شده استفاده می‌شود. سومین عامل اختلاف E_c بین دو نیمه‌هادی است که با حل معادلات نیمه‌هادی اثر آن در نظر گرفته می‌شود.

قطبی‌شدگی نقطه‌یی بر اثر وجود اتم‌های مثبت و منفی Ga و N حاصل می‌شود و رابطه‌ی آن به صورت زیر است: [۱۴] (برحسب Cm^{-2})

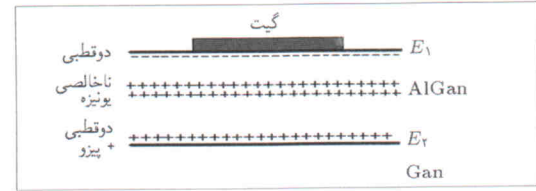
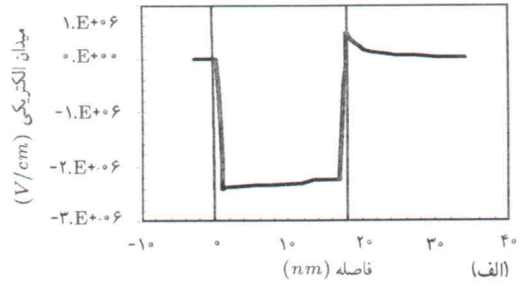
$$P_{sp} = -0.09x - 0.34(1-x) + 0.21x(1-x) \quad (1)$$

x درصد Al موجود در AlGa_N است. اختلاف قطبی‌شدگی در مرز دو جسم باعث ایجاد بار سطحی بین آن دو می‌شود.

قطبی‌شدگی پیزو الکتریک بر اثر اختلاف ثابت شبکه‌ی Ga_N و AlGa_N تشکیل می‌شود. این اثر در ضخامت‌های کم عمل می‌کند. در نتیجه فقط در لایه‌ی AlGa_N وجود دارد. موقعی که رشد در جهت

با توجه به مزیت‌های فوق، تحقیقات زیادی روی Ga_N انجام می‌گیرد که از لحاظ تکنولوژی فعلاً در مراحل اولیه‌اند و هنوز باید کار زیادی روی آن انجام گیرد. مثلاً ترازهای تله هنوز کاملاً شناخته شده نیستند [۱۰-۱۲]، و بعد از شناخت این ترازها باید عامل ایجاد آنها را شناسایی، و نحوه‌ی کنترل آنها را پیدا کرد. مسلماً برای شبیه‌سازی دقیق باید درباره‌ی ترازهای تله اطلاعات کافی داشت. در این نوشتار شبیه‌سازی با استفاده از اطلاعات موجود انجام گرفته است. برای شبیه‌سازی از برنامه SILVACO که یک برنامه‌ی فضای دوبعدی است استفاده شده است. [۱۳]

در بخش بعد، اثر پارامترهای مختلف در زیادکردن چگالی گاز

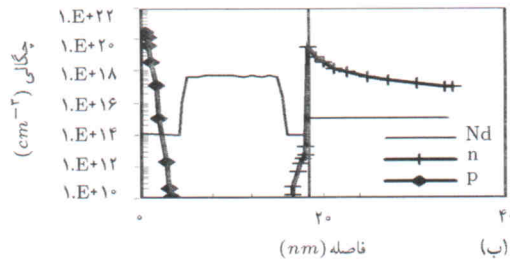


شکل ۱. بارهای ایجاد شده در اثر دوقطبی نقطه‌یی و پیزوالکتریک و همچنین بار ناخالصی یونیزه شده.

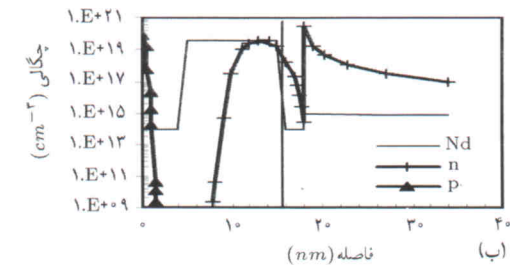
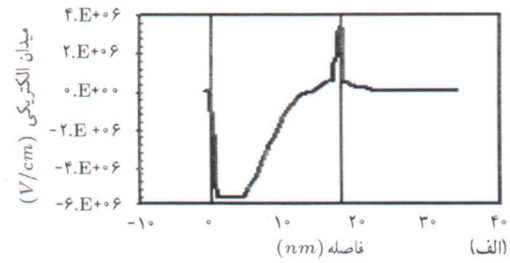
(۰۰۱) باشد رابطه‌ی آن چنین است: [۱۵]

$$P_{pz} = 2(e_{31} - e_{33}c_{21}/c_{22})u_{xx} \quad (2)$$

که در آن e_{33} و c_{21} ثابت‌های پیزوالکتریک و u_{xx} مؤلفه‌ی فشار هستند. شکل ۱ بارهای ایجاد شده در اثر قطبی‌شدگی نقطه‌یی و پیزوالکتریک را نشان می‌دهد. E_2 و E_1 به ترتیب میدان الکتریکی در سطوح فوقانی و زیرین AlGaIn هستند.



شکل ۲. الف) میدان الکتریکی، ب) چگالی ناخالصی، چگالی الکترون و چگالی حفره در چگالی ناخالصی $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.



شکل ۳. الف) میدان الکتریکی، ب) چگالی ناخالصی، چگالی الکترون و چگالی حفره در چگالی ناخالصی $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

در ضمن با زیاد شدن چگالی ناخالصی، اثر E_1 در مرز کم‌تر شده، و بدین ترتیب E_2 بزرگ‌تر شده تعداد الکترون‌های بیشتری جذب می‌شوند و چگالی الکترون کانال بیشتر می‌شود.

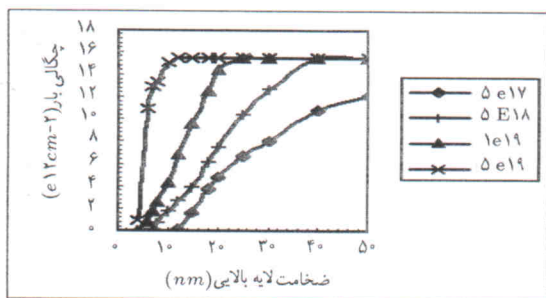
ب) اثر ضخامت لایه‌ی AlGaIn

در ضخامت لایه‌یی که اثر E_1 روی مرز AlGaIn و GaN زیاد باشد، E_2 مثبت نخواهد شد. در نتیجه همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد در مرز الکترون جمع نمی‌شود. بیشینه ولتاژی که در دو سر لایه AlGaIn قرار می‌گیرد محدود است؛ زیرا در طرف مرز با توجه به وجود گاز

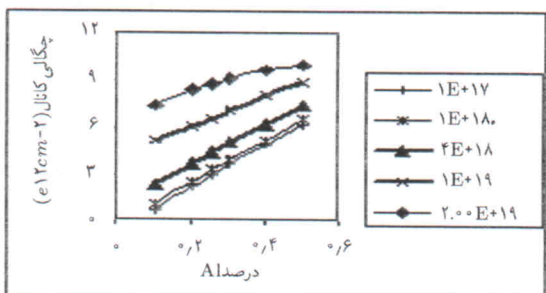
برای شبیه‌سازی از برنامه‌ی دوبعدی SILVACO استفاده شده که معادلات رانش - نفوذ را همراه با معادله‌ی پوایسون حل می‌کند. البته در این برنامه نمی‌توان اثر قطبی‌شدگی را مستقیماً وارد کرد. راه حل انتخاب شده این بوده است که چگالی ترازهای تله طوری اضافه شده‌اند که بتوانند اثر قطبی‌شدگی را در محاسبات وارد کنند. در این نوشتار یک ساختار پایه برای AlGaIn فرض شده است. اثر تغییرات پارامترهای مختلف مثل چگالی ناخالصی، ضخامت این لایه، درصد Al و تغییرات در سطح بالایی لایه بررسی می‌شود. در ساختار پایه ضخامت لایه‌ی AlGaIn ۱۸ نانومتر فرض می‌شود که ۵ نانومتر بالا و ۳ نانومتر پایین بدون ناخالصی، و در ۱۰ نانومتر بقیه چگالی ناخالصی برابر 10^{19} cm^{-3} است. Al موجود ۲۵ درصد است. [۱۶]

الف) اثر تغییر چگالی ناخالصی

در اثر وجود بارهای دوقطبی در سطح بالای AlGaIn یک میدان الکتریکی نسبتاً قوی E_1 در این محل وجود دارد و همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده، این میدان باعث تخلیه در ناحیه‌ی دارای ناخالصی می‌شود. این میدان الکتریکی در مرز بین AlGaIn و GaN، در اثر بارهای قطبی‌شدگی خنثی می‌شود. از طرف دیگر وجود بارهای دوقطبی و همچنین اختلاف E_c باعث می‌شود که الکترون‌ها در این مرز جمع شوند. وجود این بارها باعث افت میدان E_2 می‌شود (شکل ۲). در چگالی ناخالصی کم، یون‌های ناحیه تخلیه میدان الکتریکی E_1 را زیاد تغییر نمی‌دهند ولی در چگالی ناخالصی بزرگ، تخلیه شدن فقط قسمتی از ناحیه‌ی دارای ناخالصی برای از بین بردن اثر E_1 کافی است (شکل ۳). در این حالت به غیر از ناحیه‌ی مرز، در قسمت تخلیه نشده هم الکترون وجود دارد. شکل ۴ نشان می‌دهد که تا چگالی حدود $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ تمام ناحیه‌ی دارای ناخالصی تخلیه می‌شود.



شکل ۶. چگالی سطحی الکترون برحسب ضخامت AlGaIn برای چگالی ناخالصی های مختلف.



شکل ۷. چگالی سطحی الکترون برحسب درصد Al برای چگالی ناخالصی های مختلف.

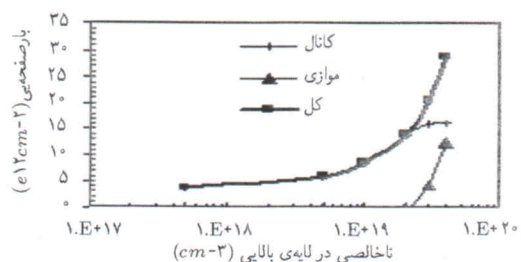
در یک چگالی ناخالص ثابت، هر چه ضخامت لایه AlGaIn بیشتر شود اثر ناخالصی ها روی ادامه ی E_1 به داخل لایه AlGaIn بیشتر می شود. در نتیجه اثر این میدان روی مرکز کم تر، و E_2 بیشتر می شود. این امر باعث می شود که چگالی گاز دوبعدی الکترون بیشتر شود. بالاخره در یک ضخامت مشخص اثر ادامه ی E_1 کاملاً خنثی می شود و اگر ضخامت بیشتر شود دیگر در ضخامت اضافه شده ناحیه ی تخلیه تشکیل نمی شود و چگالی الکترون موازی با ناحیه ی مرزی تشکیل می شود. در شکل ۶ فقط چگالی الکترون مرزی نشان داده شده است که بعد از ضخامت مشخصی این چگالی ثابت باقی می ماند.

ج) تغییر درصد Al

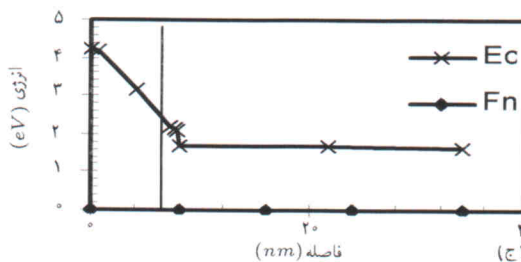
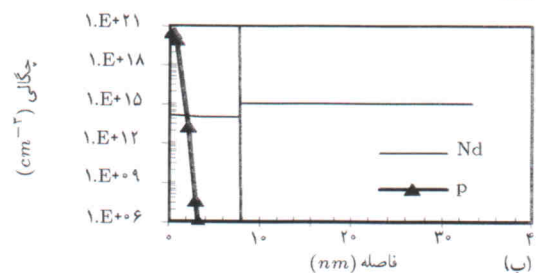
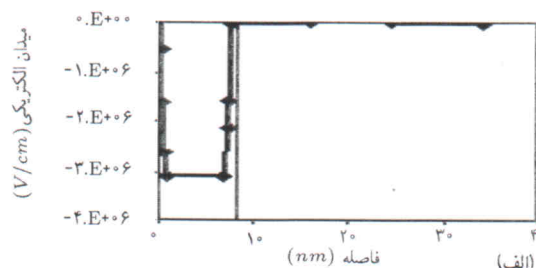
زیاد شدن Al باعث زیاد شدن اثر قطبی شدگی ها و در نتیجه زیاد شدن E_1 و E_2 می شود. با زیاد شدن E_1 ، لازم است ضخامت AlGaIn بیشتر شود تا اثر ادامه ی E_1 خنثی شود. ولی زیاد شدن E_2 باعث می شود چگالی گاز دوبعدی الکترون بیشتر شود. برای یک چگالی با ناخالصی ثابت و ضخامت ثابت، با زیاد شدن درصد Al چگالی الکترون هم بیشتر می شود (شکل ۷).

د) اثر تغییرات در سطح

در بخش «ب» درباره ی به وجود آمدن حفره در سطح بالای AlGaIn صحبت شد، ولی در هیچ آزمایشی مشاهده نشده است. علت این موضوع می تواند وجود سطح تله در بدنه یا سطح AlGaIn باشد [۱۸، ۱۷]

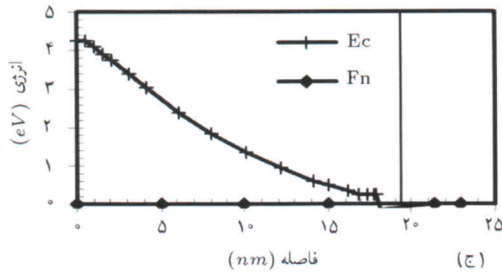
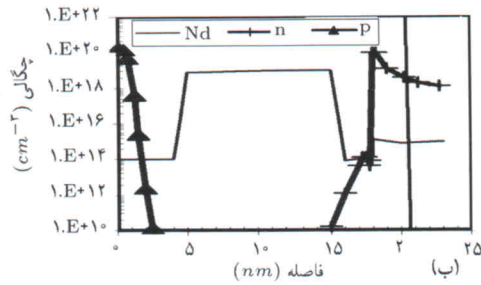
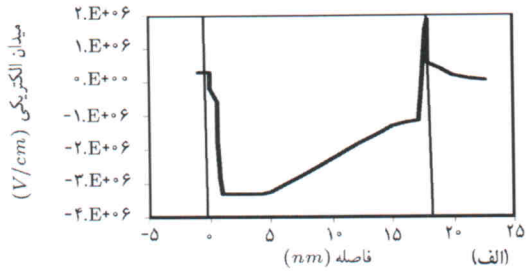


شکل ۴. چگالی سطحی الکترون نزدیک مرز AlGaIn و GaN (کانال)، چگالی سطحی الکترون داخل AlGaIn (موازی)، و جمع این دو چگالی (کل) برحسب چگالی ناخالصی در AlGaIn.



شکل ۵. الف) میدان الکتریکی، ب) چگالی ناخالصی و چگالی حفره و ج) سطح هدایت و سطح فرمی الکترون برای AlGaIn با ضخامت ۸nm.

دوبعدی الکترون، سطح فرمی نزدیک E_c است، و در طرف سطح بالایی سطح فرمی در حالت حدی در E_v قرار می گیرد. بنابراین بیشینه افت ولتاژ E_g است. از طرف دیگر وقتی ضخامت لایه ی AlGaIn زیاد می شود انتگرال میدان الکتریکی در این ناحیه زیاد می شود. در ضخامت های زیاد، به منظور زیاد شدن افت ولتاژ AlGaIn نسبت به E_g باید E_1 کم شود. همان طور که شکل ۵ ج نشان می دهد در این حالت سطح فرمی، در سطح بالا، بیشتر به E_v نزدیک می شود و در آنجا چگالی حفره زیاد می شود. این موضوع باعث می شود که E_1 کم شود، به طوری که انتگرال میدان حدود E_g شود.



شکل ۹. الف) میدان الکتریکی، ب) چگالی ناخالصی، چگالی الکترون و چگالی حفره و ج) سطح هدایت و سطح فرمی الکترون برای سطح بالا با بارهای دو قطبی صفر درصد خنثی شده.

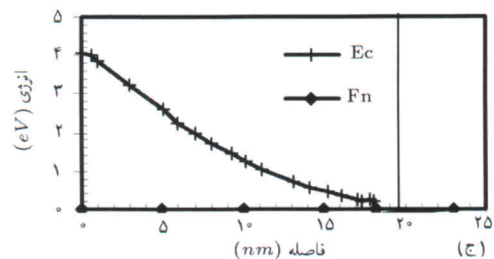
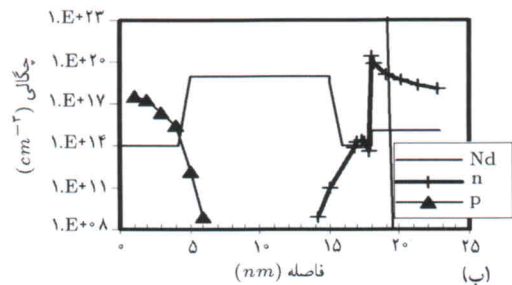
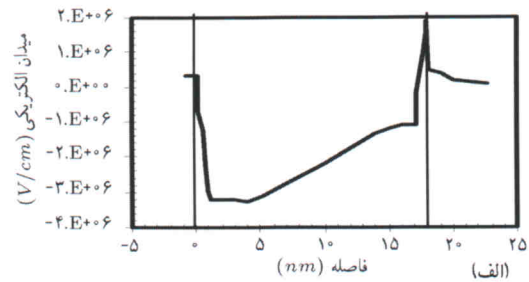
کم چگالی حفره زیادی در سطح فوقانی AlGaIn تشکیل می‌شود تا مقدار E_1 را به حدی برساند که انتگرال آن در ضخامت AlGaIn حدود E_g شود. در این ناحیه به علت ثابت ماندن مقدار E_1 ، اثر آن در مرز یکسان، و در نتیجه چگالی گاز الکترون ثابت است. وقتی اثر خنثی‌سازی متوسط می‌شود E_1 کم‌تر شده، در نتیجه اثر آن در مرز کم شده چگالی گاز الکترون زیاد می‌شود. بالاخره در خنثی‌سازی زیاد E_1 آنقدر کم می‌شود که بارهای ناخالصی می‌توانند اثر آن را خنثی کنند. در نتیجه E_1 اثری روی مرز نداشته چگالی گاز دوبعدی ثابت می‌ماند ولی چگالی الکترون موجود در ناحیه‌ی دارای ناخالصی زیاد می‌شود. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که با تغییر چگالی ناخالصی محل اتفاق افتادن سه ناحیه تغییر می‌کند.

بررسی روش زیاد کردن ولتاژ شکست

برای این بررسی بین اتصال‌های گیت و درین ولتاژ اعمال شده، و محاسبه می‌شود که در چه ولتاژی میدان الکتریکی به مقدار حالت

که نحوه‌ی تشکیل آنها و چگالی آنها بستگی به شرایط رشد و نحوه‌ی کنترل سطح انتهایی دارد. [۱۹-۲۱] با توجه به اینکه انرژی و چگالی ترازهای تله کاملاً مشخص نیست برای در نظر گرفتن اثر آنها می‌توان چنین فرض کرد که بر اثر وجود این ترازها مقداری از بارهای قطبی شدگی سطح بالا خنثی می‌شود.

شکل ۸ حالتی را نشان می‌دهد که ۵۰ درصد بارهای قطبی شدگی در سطح بالا خنثی شده‌اند. سطح E_c آن، به علت اینکه بیشینه اختلاف ولتاژ در سر AlGaIn باید در حدود E_g باشد، شبیه حالت بارهای قطبی شدگی ۰٪ خنثی شده (یا خنثی نشده) است (شکل ۹). البته در حالت صفر درصد خنثی شدن، بار حفره بیشتری در سطح بالا جمع شده تا اثر بار بیشتر قطبی شدگی را در آنجا تا حدودی کم کند و میدان الکتریکی دو حالت شبیه هم می‌شود. وقتی که بار قطبی شدگی صفر درصد خنثی می‌شود در سطح بالایی E_1 برابر صفر می‌شود (شکل ۱۰). در نتیجه ناحیه‌ی دارای ناخالصی تخلیه نمی‌شود و علاوه بر وجود الکترون مرز، در این ناحیه هم الکترون وجود دارد. همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد در درصدهای خنثی‌سازی



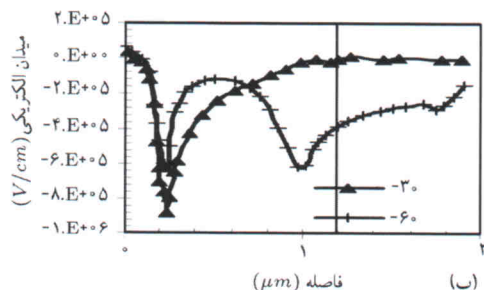
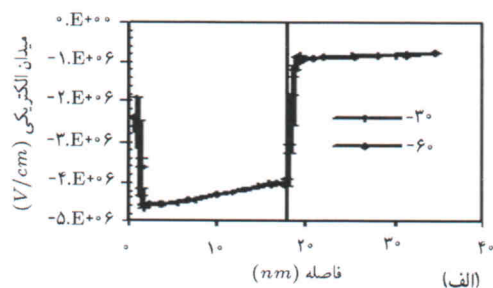
شکل ۸. الف) میدان الکتریکی، ب) چگالی ناخالصی، چگالی الکترون و چگالی حفره و ج) سطح هدایت و سطح فرمی الکترون برای سطح بالا با بارهای دو قطبی ۵۰ درصد خنثی شده.

زیادتر می‌شود. یک روش کم‌کردن گاز دوبعدی اضافه کردن گیت دوم است به طریقی که با اعمال ولتاژ به آن گاز دوبعدی زیر آن کم شود. روش دیگر آن است که فلز گیت بسط داده شود تا به شکل Γ در آید (شکل ۱۲). [۲۲] در اثر اعمال ولتاژ به گیت، گاز دوبعدی زیر قسمت اضافه شده فلز گیت کم می‌شود.

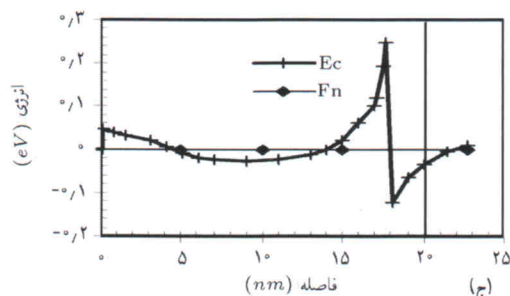
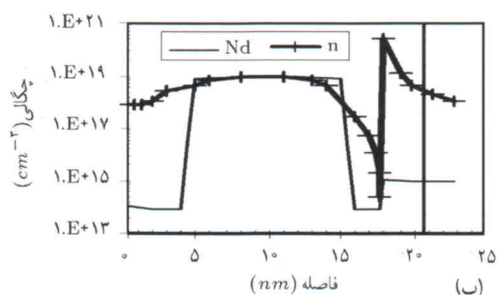
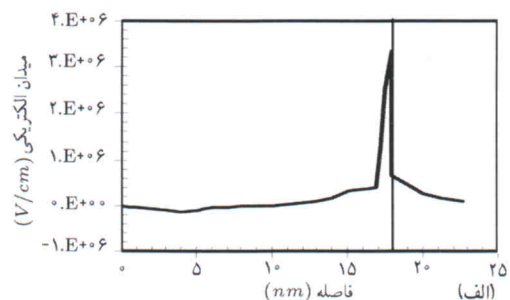
حال دو حالت فلز اتصال گیت (معمولی و گاما شکل) شبیه‌سازی شده و در مورد نحوه‌ی زیاد شدن ولتاژ شکست بحث می‌شود. میدان الکتریکی زیر گیت در شکل ۱۳ الف، و میدان الکتریکی ناحیه‌ی گاز دوبعدی در شکل ۱۳ ب نشان داده شده است. ولتاژهای اعمالی طوری انتخاب شده‌اند که میدان الکتریکی بیشینه در هر دو نوع گیت شبیه هم شود. همانطور که در شکل ۱۳ ب نشان داده شده میدان الکتریکی ناحیه‌ی گاز دوبعدی برای گیت گاما شکل بزرگتر است و در نتیجه افت ولتاژ در این ناحیه بیشتر می‌شود و باعث می‌شود که



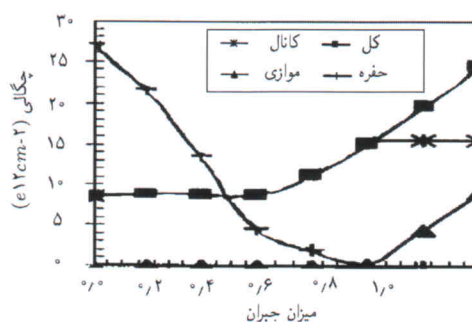
شکل ۱۲. فلز اتصال گیت.



شکل ۱۳. میدان الکتریکی در الف) زیر گیت و ب) چگالی داخل گاز دوبعدی برای حالت‌های گیت معمولی با ولتاژ اعمالی ۳۰ ولت و گیت گاما شکل با ولتاژ اعمالی ۶۰ ولت.



شکل ۱۰. الف) میدان الکتریکی، ب) چگالی ناخالصی و چگالی الکترون و ج) سطح هدایت و سطح فرمی الکترون برای سطح بالا با بارهای دوقطبی ۱۰۰ درصد خنثی شده.



شکل ۱۱. چگالی سطحی الکترون نزدیک مرز AlGaN و GaN (کانال)، چگالی سطحی الکترون داخل AlGaN (موازی)، و جمع این دو چگالی (کل) بر حسب درصد خنثی شدن سطح بالا.

بحرانی می‌رسد. کلاً ولتاژ اعمال شده برابر مجموع ولتاژ بین گیت و ناحیه‌ی گاز دوبعدی زیر گیت و ولتاژ بین گاز دوبعدی زیر گیت و درین است. اگر به طریقی کار شود که گاز دوبعدی در مسیر دوم کم شود مقاومت این مسیر زیادتر، افت ولتاژ روی آن بیشتر، و ولتاژ شکست

AlGaN بر روی چگالی گاز دوبعدی تشکیل شده در مرز بررسی شده است. با توجه به اینکه در ساختار عملی موجود، در سطح فوقانی و داخل بدنه AlGaN تله‌ها وجود دارند اثرات آنها هم بر روی گاز دوبعدی الکترونی شبه‌سازی شده است. بالاخره یک HEMT با گیت مخصوص برای زیادکردن ولتاژ شکست شبه‌سازی شده و با نتیجه‌ی آزمایش مقایسه شده است.

ولتاژ شکست این نوع گیت بیشتر شود. آزمایش هم همین نتیجه را تأیید می‌کند. [۲۲]

نتیجه‌گیری

در این نوشتار چند ساختارهای AlGaN/GaN شبه‌سازی شده است. سپس اثرات تغییر در ضخامت، چگالی ناخالصی و درصد Al در

منابع

1. Anwar, A.F.M.; Shangli Wu; Webster, R.T., "Temperature dependent transport properties in GaN, $Al_x Ga_{1-x} N$, and $In_x Ga_{1-x} N$ semiconductors", *IEEE Trans. On Elect. Devices*, **48**, pp. 567-572 (2001).
2. Sacconi, F.; Di Carlo, A.; Lugli, P.; Morkoc, H., "Spontaneous and piezoelectric polarization effects on the output characteristics of AlGa_N/Ga_N heterojunction modulation doped FETs", *IEEE Trans. On Elect. Devices*, **48**, pp.450-457 (2001).
3. Smorchkova, I. P.; Elsass, C. R.; Ibbetson, J. P.; Vetry, J. P.; Heying, B.; Fini, P.; Haus, E.; DenBaars, S. P.; Speck, J. S. and Mishra, U. K., "Polarization-induced charge and electron mobility in AlGa_N/Ga_N heterostructures grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy", *Journal of Applied Physics* **86**, pp. 4520-4526 (1999).
4. Khan, M. A.; Jessen, G.H.; Fitch, R.C.; Gillespie, J.K.; Via, G.D.; Moser, N.A.; Yannuzzi, M.J.; Crespo, A.; Sewell, J.S.; Dettmer, R.W.; Jenkins, T.J.; Davis, R.F.; Yang, J.; Binari, S.C., "High Performance 0.14 μm Gate-Length AlGa_N/Ga_N Power HEMTs on SiC", *IEEE Electron Device Letters*, **24**(11), pp. 677-679 (2003).
5. Kumar, V.; Lu, W.; Khan, F.A.; Schwindt, R.; Kuliev, A.; Simin, G.; Yang, J.; Asif Khan, M.; Adesida, I., "High performance 0.25 μm gate-length AlGa_N/Ga_N HEMTs on sapphire with transconductance of over 400 mS/mm", *Electronics Letters*, **38**, Issue 5, pp. 252-253 (28 Feb, 2002).
6. Kumar, V.; Lu, W.; Schwindt, R.; Kuliev, A.; Simin, G.; Yang, J.; Khan, M.A.; Adesida, I., "AlGa_N/Ga_N HEMTs on SiC with fT of over 120 GHz", *IEEE Electron Device Letters*, **23**, Issue 8, pp. 455-457 (Aug. 2002).
7. O. Ambacher, "Growth and Application of Group III-Nitrides", *J. Phys. D*, **31**, p. 2653 (1998).
8. Xing, H.; Dora, Y.; Chini, A.; Heikman, S.; Keller, S.; Mishra, U.K., "High breakdown voltage AlGa_N-Ga_N HEMTs achieved by multiple field plates", *IEEE Electron Device Letters*, **25**(4), pp. 161-163 (2004).
9. Thompson, R.; Prunty, Tom; Kaper, Val; Shealy, James R., "Performance of the AlGa_N HEMT structure with a gate extension", *IEEE Transactions on Electron Devices*, **51**(2), pp. 292-295 (2004).
10. De Vittorio, M.; Pot'1, B.; Todaro, M.T.; Frasanito, M.C.; Pomarico, A.; Passaseo, A.; Lomascolo, M.; Cingolani, R., "High temperature characterization of Ga_N-based photodetectors", *Sensors and Actuators A*, **113**, Issue 3, pp. 329-333 (2004).
11. Mitrofanov, O.; Manfra, M., "Mechanisms of gate lag in Ga_N/AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors", *Superlattices and Microstructures*, **34** pp. 33-53 (2003).
12. Karmalkara, S.; Sathaiya, D. M.; Shurb, M. S., "Mechanism of the reverse gate leakage in AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors", *Applied Physics Letters*, **82**(22), p. 3976 (2003).
13. WWW.SILVACO.COM.
14. O Ambacher, O.; J Majewski, J.; C Miskys, C; A Link, A.; M Hermann, M.; M Eickhoff, M.; M Stutzmann, M.; F Bernardini, F.; V Fiorentini, V.; V Tilak, V.; B Schaff, B. and L F Eastman, L.F., "Pyroelectric properties of Al(In)Ga_N/Ga_N hetero- and quantum well structures", *J. Phys.: Condens. Matter* **14**, pp. 3399-3434 (2002).
15. Shur, M. S.; Bykhovski, M. S.; Gaska, R. ; Yang, J. W. ; Simin, G.; and M. A. Khan, "Accumulation hole layer in p-Ga_N/AlGa_N heterostructures", *Appl. Phys. Lett.* **76**, p. 3061 (2000).
16. Yu, T. H. ; and Brennan, K. F. , "Theoretical study of the two-dimensional electron mobility in strained III-nitride heterostructures", *Journal of Applied Physics*, **89**, pp. 3827-3834 (2001).

17. Marso, M.; Wolter, M. ; Javorka, P.; Kordos, P.; and Lu, H., "Investigation of buffer traps in an AlGa_N/Ga_N/Si high electron mobility transistor by backgating current deep level transient spectroscopy", *Appl. Phys. Lett.* **82**(4), p. 633 (2003).
18. Javorka, P. ; Alamb, A. ; Marso, M. ; Woltera, M.; Kuzmika, J. ; Foxa, A.; Heukenb, M.; Kordos, P., "Material and device issues of AlGa_N/Ga_N HEMTs on silicon substrates", *Microelectronics Journal* **34**, pp. 435-437 (2003).
19. Lee, J.; Liu, D.; Kim, H. ; Lu, W., "Post-annealing effects on device performance of AlGa_N/Ga_N HFETs", *Solid-State Electronics*, **48**, Issues 10-11, pp. 1855-1859 (2004).
20. Luo, B.; Mehandru, R. ; Kim, J. ; Ren, F.; Gila, B.P.; Onstine, A.H.; Abernathy, C.R.; Pearton, S.J.; Gotthold, D. ; Birkhahn, R. ; Peres, B.; Fitch, R.C.; Moser, N. ; Gillespie, J.K.; Jessen, G.H.; Jenkins, T.J.; Yannuzi, M.J. ; Via, G.D. ; Crespo, A., "Improved dc and power performance of AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors with Sc₂O₃ gate dielectric or surface passivation", *Solid-State Electronics* **47**, pp. 1781-1786 (2003).
21. Bernat, J. ; Javorka, P. ; Fox, A. ; Marso, M. ; LEuth, H. ; Kordo, P., "Effect of surface passivation on performance of AlGa_N/Ga_N/Si HEMTs", *Solid-State Electronics* **47**, pp. 2097-2103 (2003).
22. Li, J. ; Cai, S. J.; Pan, G. Z. ; Chen, Y. L.; Wen, C. P.; and Wang, K. L. , "High breakdown voltage Ga_N HFET with field plate." *Electronics Letters*, **37**(3), IEE, pp. 196-197, (February, 2001).

